

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS:  
INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO, DA RELAÇÃO A/C, DA TEMPERATURA E DO  
TEMPO DE CURA

VALÉRIA GOMES ÁLVARES PEREIRA

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Porto Alegre

2001

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS:  
INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO, DA RELAÇÃO A/C, DA TEMPERATURA E DO  
TEMPO DE CURA**

**VALÉRIA GOMES ÁLVARES PEREIRA**

**Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia civil da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin**

**Porto Alegre  
2001**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Prof.<sup>a</sup>. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dr.<sup>a</sup> pela Universidade de São Paulo  
Orientadora

---

Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Cláudio de Souza Kazmierczak  
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Elton Bauer  
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Dr. pela Universidade de Leeds

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha mãe, Elza Gomes, aos meus irmãos, Gustavo Henrique e Vanessa, e a José Leonardo Guerra por terem me dado força e apoio durante mais esta etapa da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por seu amor e presença em todos os momentos da minha vida.

À professora Denise Dal Molin pela orientação segura, sugestões e esclarecimentos transmitidos durante toda a etapa de realização deste trabalho.

Ao professor José Luís Ribeiro e à Giovana Pasa, ambos da Engenharia de Produção, por toda disponibilidade no desenvolvimento e análise do projeto estatístico de experimentos desta pesquisa.

Aos professores Ângela Masuero, Carlos Formoso e todos os demais professores do NORIE pelos ensinamentos transmitidos e disponibilidade.

Às grandes amigas Mônica Batista Leite e Thaís da Costa Lago Alves com quem tive a oportunidade de conviver e dividir todos os momentos, durante estes dois anos em Porto Alegre. Com a amizade, o companheirismo, a força e o exemplo de vocês consegui vencer, esta etapa da minha vida.

Ao amigo Washington Almeida Moura pelo carinho, amizade, incentivo e ajuda dados em todos os momentos do desenvolvimento desta pesquisa, com quem aprendi bastante.

Aos amigos Andréa e Barros Neto, Antônio Eduardo Cabral, Ercília Hirota e Roberto Barbosa com quem pude contar e compartilhar muitos bons momentos.

À Anelise Hoffmann com quem formei uma dupla de trabalho e dividi todas as alegrias e angústias durante a realização desta pesquisa.

Aos colegas de turma Andréa Yuba, Maki Tokudome, Marcelo Azambuja, Cristina Wayne, Giane Grigoletti, Rogério Antochaves.

Aos amigos Maurício Bernardes, Andréa Kern, Águida Abreu, Fernanda Vieira, Jairo Andrade, Adriana Silveira, Adriana Gumieri, Marlova Kulakowski, Patrícia Pedrozo, Diana, Maurício Mancio, Tamara, Denise Pittan, Rosana, Renato das Neves, Ricardo Codinhoto, Dayana, Daniel Pagnussat, Fabiano e muitos outros com quem convivi durante este período.

Aos auxiliares de pesquisa: Juliana, Rodrigo Pettermann, Lisandro, Rodrigo Benedeti e, em especial, Márcio Borsoi pelo apoio e empenho na fase experimental.

Ao pessoal do LEME: Fontes, Airton, Ederson, Vanderley, Flávio, Seu Texeirinha, Bueno, Luís Carlos, Daniela e Tarso por toda ajuda.

À Lúcia Helena e Luís Carlos pela atenção e disponibilidade.

As funcionárias do PPGEC pelo empenho e atenção que é dada aos alunos.

À CAPES pelo financiamento da bolsa de estudo para o desenvolvimento desta pesquisa.

À SIKA, Camargo Corrêa e CIMPOR pela doação de alguns materiais necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus tios, primos, pai e todos da minha família, em especial à minha avó Elizabete e às tias: Aldinha, Edna, Raimunda e Gracinha.

A todos que ajudaram de alguma forma para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XIII
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	3
1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	3
1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 DURABILIDADE.....	5
2.2 VIDA ÚTIL.....	6
2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE NO CONCRETO.....	8
<b>2.3.1 Permeabilidade.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.2 Absorção capilar.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3.3 Difusão de íons.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3.4 Migração de íons.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.5 Mecanismos combinados.....</b>	<b>16</b>
2.4 CORROSÃO DA ARMADURA NO CONCRETO.....	17
2.5 AÇÃO DOS ÍONS CLORETOS.....	20
<b>2.5.1 Fontes de cloretos para o concreto.....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.2 Tipos de cloreto no concreto.....</b>	<b>25</b>
<b>2.5.3 Teor crítico de cloretos.....</b>	<b>27</b>
<b>2.5.4 Fatores que influenciam o ingresso de cloretos no concreto.....</b>	<b>29</b>
2.5.4.1 Relação água/cimento.....	29
2.5.4.2 Temperatura de cura.....	31
2.5.4.3 Composição química do cimento e adições.....	33
2.5.4.4 Tempo de cura.....	37

2.5.5	<b>Métodos para previsão do ingresso de cloretos no concreto</b> .....	39
2.5.5.1	Ensaio de penetração acelerada de cloretos.....	39
2.5.5.2	Ensaio de Migração de cloretos.....	41
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>43</b>
3.1	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS .....	43
3.1.1	Variáveis analisadas .....	43
3.1.2	Projeto estatístico .....	44
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	47
3.2.1	Tipos de cimentos.....	47
3.2.2	Agregado graúdo .....	48
3.2.3	Agregado miúdo.....	49
3.2.4	Aditivo químico .....	49
3.2.5	Água .....	50
3.3	DOSAGEM EXPERIMENTAL.....	50
3.3.1	Ajuste do teor ideal de argamassa .....	50
3.3.2	Traços auxiliares.....	50
3.3.3	Obtenção dos traços de concreto a serem estudados .....	51
3.4	PRODUÇÃO DO CONCRETO .....	55
3.4.1	Mistura dos materiais .....	55
3.4.2	Moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova .....	55
3.5	PROPRIEDADES AVALIADAS.....	56
3.5.1	Migração de íons cloretos .....	56
3.5.2	Penetração acelerada de íons cloretos.....	60
3.5.3	Resistência à compressão axial .....	63
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>65</b>
4.1	MIGRAÇÃO DE CLORETOS.....	66
4.1.1	Efeitos isolados da relação água/cimento e do tipo de cimento sobre a migração de cloretos no concreto.....	67
4.1.2	Efeitos isolados da idade e do tipo de cimento sobre a migração de cloretos do concreto.....	68



4.1.3	Efeitos isolados da temperatura de cura e do tipo de cimento sobre a migração de cloretos no concreto.....	69
4.2	PENETRAÇÃO ACELERADA DE CLORETOS.....	70
4.2.1	Efeito isolado da relação água/cimento sobre a penetração acelerada de cloretos no concreto.....	71
4.2.2	Efeitos da idade e do tipo de cimento sobre a penetração acelerada de cloretos no concreto.....	72
4.2.3	Efeitos da temperatura de cura e do tipo de cimento sobre a penetração acelerada de cloretos no concreto.....	74
4.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	75
4.3.1	Efeitos isolados da relação água/cimento e do tipo de cimento sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	76
4.3.2	Efeitos isolados da idade e do tipo de cimento sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	77
4.3.3	Efeitos isolados da temperatura de cura e do tipo de cimento sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	79
4.3.4	Efeito da interação relação água/cimento x temperatura de cura sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	80
4.4	CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E OS OUTROS PARÂMETROS.....	83
4.5	COMPARAÇÃO ENTRE O ENSAIO DE PENETRAÇÃO E O DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS.....	85
4.6	PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DOS CONCRETOS ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS.....	89
4.6.1	Procedimento.....	90
4.6.2	Resultados.....	92
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
5.1	CONCLUSÕES.....	97
5.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	100
6	BIBLIOGRAFIA.....	101
	ANEXOS.....	111
	ANEXO 1 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL...	112
	ANEXO 2 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE PENETRAÇÃO ACELERADA DE CLORETOS .....	114

ANEXO 3 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS .....	117
ANEXO 4 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA TODAS AS VARIÁVEIS ANALISADAS.....	135

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Modelo de vida útil de TUUTTI (1982) .....	7
<b>Figura 2</b> Atuação simultânea de diversos mecanismos de transporte em uma estrutura marítima ( <i>Concrete Society Working Party</i> apud PERRATON et al., 1992).....	17
<b>Figura 3</b> Diagrama simplificado de Pourbaix para o sistema Fe-H <sub>2</sub> O (GENTIL, 1996).....	21
<b>Figura 4</b> Esquema da corrosão por pites com atuação dos íons cloreto (THOMPSON et al., 1988) .	23
<b>Figura 5</b> Influência da relação água/cimento no coeficiente efetivo de difusão de cloretos em pastas de cimento (MACDONALD e NORTHWOOD, 1995) .....	30
<b>Figura 6</b> Influência do teor de C <sub>3</sub> A na quantidade de íons cloreto livres, a 20 e 70°C (HUSSAIN e RASHEEDUZZAFAR, 1993) .....	32
<b>Figura 7</b> Penetração de íons cloretos <i>versus</i> o tempo de cura em concretos (PLANTE e BILODEAU, 1989).....	38
<b>Figura 8</b> Projeto de composição central para 3 fatores ou variáveis .....	45
<b>Figura 9</b> Diagrama de dosagem para os concretos confeccionados com CP II F .....	51
<b>Figura 10</b> Diagrama de dosagem para os concretos confeccionados com CP IV .....	52
<b>Figura 11</b> Diagrama de dosagem para os concretos que possuem relação água/cimento entre 0,28 e 0,35 com CP II F .....	53
<b>Figura 12</b> Diagrama de dosagem para os concretos que possuem relação água/cimento entre 0,28 e 0,35 com CP IV .....	54
<b>Figura 13</b> Aspecto do corpo-de-prova embalado em saco plástico para cura .....	56
<b>Figura 14</b> Realização do ensaio de migração de cloretos .....	57
<b>Figura 15</b> Revestimento do corpo-de-prova de concreto com resina epóxi.....	57
<b>Figura 16</b> Célula positiva utilizada no ensaio.....	58
<b>Figura 17</b> Vedação da célula positiva com poliuretano .....	58
<b>Figura 18</b> Medição da concentração de cloretos através do eletrodo de íon seletivo .....	59
<b>Figura 19</b> Forma da curva de evolução da concentração de cloretos na célula positiva (DHIR et al., 1990).....	60
<b>Figura 20</b> Impermeabilização das faces laterais do corpo-de-prova com resina epóxi.....	61

<b>Figura 21</b>	Corpos-de-prova submersos na água .....	62
<b>Figura 22</b>	Fixando o corpo-de-prova na meia célula com poliuretano .....	62
<b>Figura 23</b>	Esquema para realização do ensaio de penetração de cloretos .....	63
<b>Figura 24</b>	Efeitos isolados da relação água/cimento e do tipo de cimento sobre o coeficiente efetivo de difusão de cloretos .....	67
<b>Figura 25</b>	Efeitos isolados da idade e do tipo de cimento sobre o coeficiente efetivo de difusão de cloretos.....	68
<b>Figura 26</b>	Efeitos isolados da temperatura de cura e do tipo de cimento sobre o coeficiente efetivo de difusão de cloretos .....	70
<b>Figura 27</b>	Efeito isolado da relação água/cimento sobre a carga total passante.....	71
<b>Figura 28</b>	Efeitos da idade e do tipo de cimento sobre a carga total passante.....	73
<b>Figura 29</b>	Efeitos da temperatura de cura e do tipo de cimento sobre a carga passante .....	74
<b>Figura 30</b>	Resistência à compressão axial em função dos efeito isolados da relação água/cimento e do tipo de cimento .....	76
<b>Figura 31</b>	Resistência à compressão axial em função dos efeitos isolados da idade e do tipo de cimento.....	78
<b>Figura 32</b>	Resistência à compressão axial em função dos efeitos isolados da temperatura de cura e do tipo de cimento .....	79
<b>Figura 33</b>	Resistência à compressão em função do efeito da interação relação água/cimento x temperatura de cura: a) Gráfico de $f_c$ (temperatura de cura) para o CP II F; b) Gráfico $f_c$ (relação água/cimento) para o CP II F; c) Gráfico de $f_c$ (temperatura de cura) para o CP IV; b) Gráfico $f_c$ (relação água/cimento) para o CP IV.....	81
<b>Figura 34</b>	Relação entre a carga total passante e a resistência à compressão: a) para o cimento CP II F; b) para o cimento CP IV .....	83
<b>Figura 35</b>	Relação entre o coeficiente de difusão de cloretos e a resistência à compressão: a) para o cimento CP II F; b) para o cimento CP IV .....	84
<b>Figura 36</b>	Relação entre a carga total passante e o coeficiente de difusão de cloretos: a) para o cimento CP II F; b) para o cimento CP IV .....	85
<b>Figura 37</b>	Visualização das faces dos corpos-de-prova expostas a solução com cloretos.....	87
<b>Figura 38</b>	Visualização das faces dos corpos-de-prova expostas a água deionizada.....	87
<b>Figura 39</b>	Difratograma da amostra coletada da face dos corpos-de-prova em contato com a solução com cloreto de sódio.....	88

<b>Figura 40</b> Evolução da concentração de cloretos com a espessura do cobrimento, nos concretos produzidos com relações água/cimento de 0,28, 0,45 e 0,75 e cimento a) CP II F e b) CP IV .....	92
<b>Figura 41</b> Evolução da concentração de cloretos com o tempo, nos concretos produzidos com relações água/cimento de 0,28, 0,45 e 0,75 e cimento a) CP II F e b) CP IV .....	93
<b>Figura 42</b> Evolução da concentração de cloretos com a espessura do cobrimento, nos concretos expostos a temperaturas de 5, 25 e 40°C e produzidos com cimento a) CP II F e b) CP IV .....	94
<b>Figura 43</b> Evolução da concentração de cloretos no tempo, nos concretos expostos a temperaturas de 5, 25 e 40°C e produzidos com cimento a) CP II F e b) CP IV .....	95
<b>Figura 44</b> Evolução da concentração de cloretos com o tempo, dos concretos produzidos no ensaio de migração de cloretos .....	120
<b>Figura 45</b> Evolução da corrente com o tempo, dos concretos produzidos no ensaio de migração de cloretos.....	127

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Relação entre permeabilidade e relação água/cimento para pastas com 93% do cimento hidratado (NEVILLE, 1997) .....	10
<b>Tabela 2</b> Limites normalizados para o teor total de cloretos no concreto (HELENE, 1993).....	28
<b>Tabela 3</b> Parâmetros de Processo.....	46
<b>Tabela 4</b> Propriedades químicas, físicas e mecânicas do CP II F-32 .....	47
<b>Tabela 5</b> Propriedades químicas, físicas e mecânicas do CP IV-32.....	48
<b>Tabela 6</b> Características do agregado graúdo .....	49
<b>Tabela 7</b> Características do agregado miúdo.....	49
<b>Tabela 8</b> Traços em massa para a produção dos concretos e consumo de cimento/m <sup>3</sup> .....	54
<b>Tabela 9</b> Descrição dos ambientes em que os corpos-de-prova ficaram expostos .....	56
<b>Tabela 10</b> Ingresso de íons cloreto baseado na carga passante (ASTM C 1202) .....	63
<b>Tabela 11</b> Níveis codificados de cada uma das variáveis independentes utilizadas.....	66
<b>Tabela 12</b> Características dos concretos utilizados para modelagem da vida útil.....	91
<b>Tabela 13</b> Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial.....	113
<b>Tabela 14</b> Resultados dos ensaios de penetração acelerada de cloretos.....	115
<b>Tabela 15</b> Temperatura máxima atingida durante a realização do ensaio da ASTM .....	116
<b>Tabela 16</b> Resultados dos coeficientes de difusão do ensaio de migração, dos concretos produzidos com CP II F .....	118
<b>Tabela 17</b> Resultados dos coeficientes de difusão do ensaio de migração, dos concretos produzidos com CP IV .....	119

# **AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS: INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO, DA RELAÇÃO A/C, DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE CURA**

**Valéria Gomes Álvares Pereira**

## **RESUMO**

É consenso mundial a importância de estudos sobre a penetração de cloretos nos concretos, devido ao caráter deletério destes íons quanto à corrosão das armaduras. Quando os íons cloretos ingressam no concreto em quantidade suficiente causam a despassivação e a corrosão das armaduras, conduzindo à diminuição da vida útil das estruturas. Os cloretos podem ser introduzidos no concreto de várias maneiras: como aditivo, pela contaminação da água ou da areia, ou podem ingressar provindos do meio externo. Os cloretos potencialmente agressivos geralmente penetram na estrutura dissolvidos em água, através dos mecanismos de penetração de água e transporte de íons, sendo um dos mecanismos que ocorrem com maior frequência a difusão. Este mecanismo de penetração de íons cloretos nas estruturas de concreto armado é influenciado pela relação água/aglomerante, o tipo de cimento, a presença de adições, a cura, o tempo, a temperatura de exposição, dentre outros, e seus valores ainda podem ser utilizados em modelos matemáticos para previsão de vida útil. Assim, este trabalho objetiva avaliar o coeficiente de difusão de cloretos em concretos confeccionados com dois tipos diferentes de cimento (CP II F e CP IV), cinco distintas relações água/cimento (0,28, 0,35, 0,45, 0,60 e 0,75), cinco temperaturas de cura (5, 15, 25, 30 e 40°C) e cinco diferentes idades (7, 14, 28, 63 e 91 dias). Paralelamente foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e penetração acelerada de cloretos. A metodologia utilizada permitiu avaliar e medir os coeficientes de difusão de cloretos nos concretos confeccionados, tendo sido observados que os coeficientes diminuem com a elevação da temperatura de cura e da idade, com o uso do cimento CP IV e com a redução da relação água/cimento.

# **AVALIATION THE CHLORIDES DIFFUSION COEFFICIENT IN CONCRETE MADE WITH DIFFERENTS TYPES OF PORTLAND CEMENT, WATER/CEMENT RATIO, TEMPERATUES OF CURING AND AGES OF HYDRATION**

**Valéria Gomes Álvares Pereira**

## **ABSTRACT**

The importance of the studies about ingress of chloride ions in concrete structures is increasing fast all over the world, mainly because the corrosion of steel reinforcement caused by them. The ingress of chlorides into concrete is responsible for the destruction of the protective passivity layer on the surface of steel and, in presence of water and oxygen, corrosion occurs. As consequence, there is a reduction of structures life service. Chlorides can be incorporated in the mix through the use of contaminated aggregate or of seawater, or by admixtures containing chlorides. Chlorides usually penetrate concrete by transport of water containing these ions, mainly by diffusion. This mechanism of ingress of chloride ions into concrete is deeply influenced by water/cement ratio, type of cement, use of admixtures, methods of curing, age of hydration, temperature of exposure, etc. The diffusion values can be used in mathematical models to life service prediction. Then, the main goal of this work is to evaluate the chlorides diffusion coefficient in concrete made with two types of Portland cement (CP II F and CP IV), five water/cement ratio (0.28, 0.35, 0.45, 0.60 and 0.75), five temperatures of curing (5, 15, 25, 30 and 40°C) and five ages of hydration (7, 14, 28, 63 and 91 days). The compression strength and accelerated ingress of chlorides of some concrete specimens were analysed. Finally, the analysis of results showed that the chlorides diffusion coefficient tend to be lower to higher temperatures of curing and ages of hydration and lower water/cement ratio when it is using CP IV, as Portland cement.



# 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material que apresenta vantagens na sua utilização, como por exemplo versatilidade e menor custo, se comparado a outros materiais de construção, sendo por isso largamente utilizado em todo o mundo (MEHTA e MONTEIRO, 1994). No entanto, inúmeros problemas relacionados com seu desempenho, especificamente sua durabilidade, vêm sendo detectados.

Até poucos anos atrás, o principal enfoque dos projetistas das estruturas de concreto armado era relacionado às propriedades mecânicas do concreto, com foco na resistência à compressão. Porém, ultimamente, as preocupações com os custos de manutenção, reforço e recuperação das estruturas têm provocado uma mudança nesse comportamento, por ter sido constatado que aspectos referentes à durabilidade das estruturas são mais abrangentes, e envolverem, inclusive, os aspectos relativos às propriedades mecânicas dos concretos (ISAIA e HELENE, 1993).

O aumento do número de manifestações patológicas é um forte indicativo que as edificações existentes estão envelhecendo precocemente. Nos EUA, segundo dados apresentados por MEHTA (1993), 253.000 pontes e viadutos mostram algum tipo de deterioração, sendo 35.000 novos casos adicionados a este conjunto a cada ano. De acordo com ANDRADE (1997), este crescimento ocorre pelo emprego inadequado de práticas executivas durante as diversas etapas do processo construtivo (planejamento/projeto, materiais, execução e utilização/manutenção) e pelo efeito combinado da agressividade ambiental com os problemas de ordem estrutural. Constata-se, também, um aumento significativo dos gastos com recuperação de edificações em função de manutenções não previstas.

Uma das manifestações patológicas mais freqüentes em estruturas de concreto armado é a corrosão de armaduras, e sua evolução compromete significativamente a segurança estrutural das obras (HELENE, 1997). GU et al. (1996) citam que, estudos realizados nos Estados Unidos, pelo *Strategic Highway Research Program*, mostram que até 1996 foram gastos aproximadamente US\$ 20 bilhões na recuperação de pontes que apresentavam corrosão de armadura, sendo este valor crescente a uma taxa de US\$ 500 milhões por ano. Um outro autor (WAYERS, 1998), com dados de 1991, aponta que 32% das 574.671 pontes americanas têm problemas estruturais e que, para recuperá-las seriam necessários US\$ 70 bilhões, dos quais US\$ 28 bilhões seriam gastos com recuperação de corrosão.

Dentro deste contexto e para prevenir problemas, as estruturas de concreto devem ser projetadas em função das solicitações mecânicas e das distintas condições ambientais, e executadas para manter condições mínimas de segurança, estabilidade e funcionalidade ao longo da sua vida útil,

sem custos não previstos de recuperação. Por outro lado, nenhum material é eternamente durável, e o concreto não foge à regra. Com o decorrer do tempo, suas propriedades vão mudando, como resultado de interações ambientais e da sua estrutura interna (NEVILLE, 1997). Este fato tem levado ao desenvolvimento de muitos estudos com relação à durabilidade do concreto, que têm evoluído com o maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e gases agressivos no interior dos meios porosos, como é o caso do concreto.

De acordo com NEVILLE (1997), o que determina a penetração e deslocamento dos agentes agressivos no concreto é a estrutura da sua pasta de cimento hidratada, as suas características químicas e físicas, a concentração superficial das substâncias agressivas e as condições ambientais (umidade, temperatura e concentração de agentes agressivos). Esta penetração e deslocamento de gases, líquidos e íons no concreto só é possível por este ser um material poroso, ou seja, nem todo o seu volume é preenchido quando o mesmo encontra-se no estado endurecido (COUTINHO e GONÇALES, 1994).

Existem quatro tipos de mecanismos de penetração e transporte no concreto: absorção capilar, permeabilidade, migração iônica e difusão. Os modelos matemáticos para previsão de vida útil das estruturas são baseados nos mecanismos de transporte de água, gases e agentes agressivos através da rede de poros do concreto, como a difusão (HELENE, 1993).

A penetração de íons cloreto na estrutura do concreto pode provocar a despassivação da armadura e gerar a formação de pilhas eletroquímicas, deflagrando a corrosão da armadura (RODOLPHO e ISA, 1999). O teor de cloretos livres é que irá definir a agressividade destes íons, sendo determinante para a relação entre cloretos livres e cloretos combinados as características dos cimentos, a estrutura de poros e a natureza química das substâncias agressivas (PAGE et al., 1991a).

De acordo com MEDEIROS et al. (1999), a influência do tipo de cimento na penetração de íons cloretos está relacionada à composição química deste, pois o  $C_3A$  e o  $C_4AF$  se combinam com os cloretos para formar os cloroaluminatos. Com esta reação, o fluxo de penetração de cloretos diminui devido a menor concentração de íons livres na solução aquosa dos poros do concreto. Portanto, quanto maior o teor de  $C_3A$  no cimento, mais tempo levará a corrosão das armaduras para se iniciar (RASHEEDUZZAFAR, 1992).

Apesar da evolução nos últimos anos, nesse campo, há necessidade em se conhecer mais o concreto e a geometria da sua estrutura, avaliando e classificando o grau de agressividade do ambiente. Desta forma, pode-se fazer uma estimativa, com maior precisão, da vida útil das estruturas, abordando de forma quantitativa a questão da sua durabilidade.

Neste trabalho pretende-se estudar a difusão de cloretos no concreto, pois segundo LOPES (1999), este mecanismo apresenta uma grande importância na durabilidade das estruturas de concreto armado, já que o mesmo controla a penetração de íons cloretos e dióxido de carbono nessas estruturas. Esses agentes agressivos podem comprometer as estruturas de concreto armado por propiciar a carbonatação da pasta de cimento hidratado, uma despassivação do aço e uma possível corrosão da armadura do concreto, sendo que a maioria dos problemas de corrosão de armaduras pode estar relacionada à presença de íons cloretos (ARYA e XU, 1995). Portanto, pretende-se determinar valores numéricos para os coeficientes de difusão, de diferentes misturas de concretos, frente à penetração de íons cloretos.

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Este trabalho tem como objetivo geral determinar os valores dos coeficientes de difusão de cloretos, em concretos confeccionados com diferentes relações água/cimento, tipos de cimentos, temperaturas e tempo de cura.

E tem como objetivos específicos:

- determinar a resistência à penetração de íons cloreto nos concretos produzidos;
- avaliar a influência de diferentes temperaturas, tempo de cura, tipos de cimentos e relações água/cimento na resistência à compressão axial dos concretos confeccionados;
- fazer uma análise comparativa entre os métodos de penetração de cloretos da ASTM 1202 C / 92 e o proposto por ANDRADE (1993);
- prever a vida útil dos concretos produzidos através de modelos matemáticos;
- analisar comparativamente à resistência à compressão axial dos concretos produzidos com os parâmetros de durabilidade estudados neste trabalho.

## 1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

A apresentação da pesquisa foi estruturada em cinco capítulos, conforme descrito a seguir.

O presente capítulo contém a introdução, onde se faz uma contextualização do tema, destacando-se os objetivos a serem atingidos pelo trabalho, suas limitações e a estrutura da pesquisa.

No segundo capítulo é feita, através da discussão dos resultados de uma revisão bibliográfica, uma abordagem de temas julgados importantes para um completo entendimento deste trabalho.

Apresentam-se inicialmente conceitos básicos como durabilidade, vida útil, mecanismos de transporte no concreto e corrosão de armadura neste. Enfoca-se então, especificamente, a ação dos íons cloreto, suas fontes de ingresso, tipos, teores críticos e os fatores que influenciam sua penetração no concreto. É fornecida ainda uma descrição dos métodos utilizados, neste trabalho, para medir a penetração de cloretos no concreto.

O procedimento experimental é abordado no capítulo 3. Nele apresenta-se a caracterização dos materiais, a definição dos ensaios e a confecção dos corpos-de-prova. Aborda-se ainda a metodologia do ensaio adotada para a determinação do coeficiente de difusão, bem como a dos ensaios complementares de resistência à compressão axial e penetração acelerada de cloretos.

No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos durante o programa experimental, e discutidos os mesmos, a partir de argumentos embasados na revisão bibliográfica.

O quinto capítulo traz, de maneira sucinta, as conclusões da pesquisa, abordando a influência das variáveis estudadas sobre o coeficiente de difusão de cloretos, a penetração destes íons no concreto, bem como, na resistência à compressão. Também fazem parte deste capítulo sugestões para futuros trabalhos.

### 1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Por limitações de tempo e recursos para realização da pesquisa, não foi possível abordar em um único trabalho mais variáveis, como outros tipos de cimentos, incorporações de adições ao concreto, bem como valores superiores as das variáveis estudadas, dentre outras. Portanto, esses outros aspectos que influenciam na penetração de cloretos não serão abordados.

Para esta pesquisa foram definidos cinco níveis para a relação água/cimento, a temperatura e o tempo de cura, como também dois tipos de cimentos, e os resultados limitam-se a estas variáveis. Mudanças nas mesmas podem implicar em resultados diferentes.

Vale a pena ressaltar também que é um pouco escassa a bibliografia encontrada, sobre o estudo específico que se propõe a pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DURABILIDADE

Segundo o CIB W80/RILEM 71-PSL (1983), a durabilidade é “a capacidade que um produto, componente ou construção possui de manter o seu desempenho acima dos níveis mínimos especificados, de maneira a atender às exigências dos usuários, em cada situação específica”.

De acordo com o Comitê do ACI-201 (1991), durabilidade pode ser entendida como a capacidade para resistir a ações de intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração.

As estruturas de concreto armado devem ser construídas para desempenhar as funções que lhe foram atribuídas, durante um período de vida previsto ou, pelo menos, razoável. Assim, segundo NEVILLE (1997), o concreto é considerado durável.

O concreto, quando comparado a outros materiais estruturais, é o de uso mais difundido e o mais versátil pelas características que apresenta. Entretanto, apesar das grandes vantagens que possui, alguns problemas têm sido detectados com relação à sua durabilidade. Nos últimos anos, vários estudos vêm sendo realizados sobre patologias de concretos e deterioração prematura das edificações (ANDRADE, 1997; NINCE, 1996; ARANHA, 1994; LIBÓRIO, 1990; DAL MOLIN, 1988, dentre outros).

Os problemas de durabilidade são freqüentemente causados por uma conjunção de fatores que incluem a falta de conhecimento do meio ambiente a que ficarão expostas as estruturas, especificações inadequadas e construção executada em desacordo com normas técnicas.

Isto é importante porque dependendo das condições ambientais e climáticas, o concreto está submetido aos efeitos de um conjunto de agentes agressivos e diferentes fatores destrutivos, que podem atuar de maneira isolada ou conjunta, associando-se a cada um deles efeitos característicos. O resultado das interações ambientais com a microestrutura do concreto é a mudança de suas propriedades (SILVA e DJANIKIAN, 1993). Se as estruturas não são bem projetadas e executadas as mesmas não resistem a este desgaste ambiental pelo tempo requerido em projeto.

As ações do meio ambiente são devidas a agentes climáticos (temperatura e umidade, compreendendo ações de alternâncias de temperaturas que provocam o congelamento e o degelo da água no interior do material e de molhagem e secagem, da radiação solar, entre outros), agentes químicos (presença de íons agressivos no concreto no meio fluido que o envolve) e agentes biológicos (como microorganismos).

De acordo com MEHTA (1993) e SILVA FILHO (1994), a durabilidade das estruturas de concreto armado é controlada por dois fatores: o concreto em si, como material compósito, e as condições do meio ambiente circundante das estruturas. Como, em geral, não se pode lidar com a melhoria das condições ambientais e, considerando que, quanto mais vulnerável for o concreto ao transporte interno de água, gases e outros agentes agressivos, maior será a probabilidade da sua degradação, a única saída, para se evitar a degradação dos concretos, é a redução, ao menor nível possível, da sua porosidade (SOUZA e RIPPER, 1998).

A qualidade do concreto depende, principalmente, da relação água/cimento, da cura e do grau de hidratação, sendo esses os principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar de água, de permeabilidade, de migração de íons e de difusividade de água ou de gases, bem como a maioria das propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, à tração, o módulo de elasticidade, abrasão, dentre outras (HELENE, 1997). Segundo o mesmo autor, a qualidade do concreto na obra deve ser assegurada por procedimentos corretos de mistura, transporte, lançamento, adensamento, desmoldagem, cura e por critérios adequados de projeto.

A incorporação de materiais pozolânicos, como adição ou em substituição do cimento, em geral, quando em teores adequados, aumenta a durabilidade de argamassas e concretos, desde que seja efetuada uma cura adequada. Este fato ocorre devido ao  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , oriundo das reações de hidratação do cimento, reagir com a pozolana para formar produtos de hidratação secundários (C-S-H de baixa densidade) que preenchem os vazios capilares grandes e refinam a estrutura dos poros. Isto acarreta uma redução na porosidade e um ganho na resistência mecânica. À medida que se reduz o ingresso de agentes agressivos, o concreto se torna mais resistente a ambientes agressivos, desde que não ocorram alterações críticas na microestrutura, como por exemplo uma queda significativa da reserva alcalina. Outro aspecto positivo da reação pozolânica é a redução do teor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  da matriz de cimento, tornando-a mais resistente ao ataque de sulfatos e à ocorrência da reação álcali-agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Cabe ressaltar que a resistência de uma estrutura de concreto à ação do meio ambiente e ao uso dependerá da resistência do concreto e da resistência da armadura, ou seja, qualquer um dos dois que se deteriore comprometerá a estrutura como um todo (HELENE, 1997). Isto explica a importância do controle da corrosão.

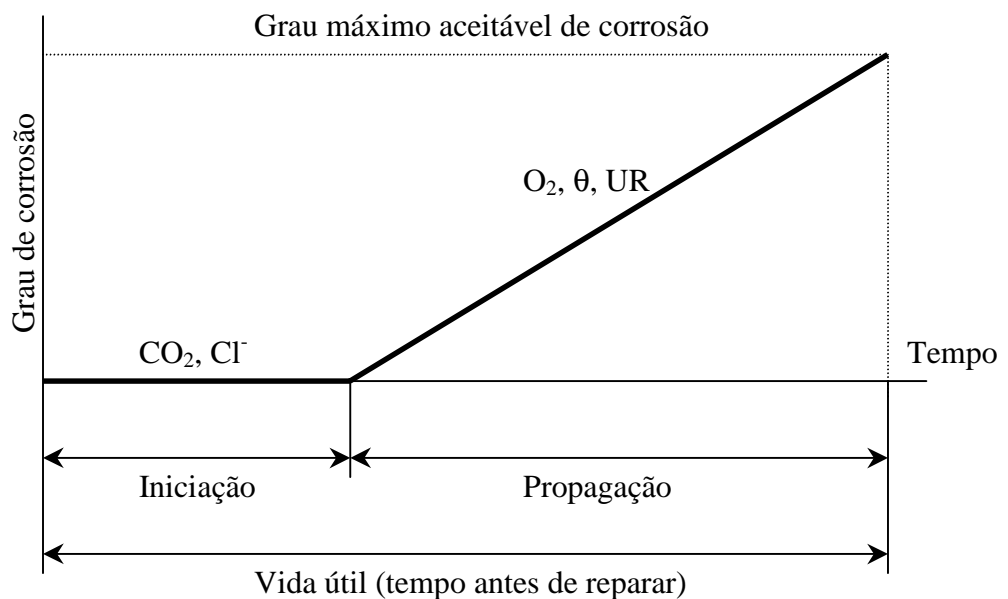
## 2.2 VIDA ÚTIL

Estimar a vida útil das estruturas de concreto armado é de fundamental importância para que se possa abordar, de forma quantitativa, a questão da durabilidade das estruturas.

De acordo com ANDRADE (2000a), entende-se por vida útil o período de tempo em que a estrutura conserva seus requisitos de projeto como segurança, funcionalidade e estética, sem custos inesperados de manutenção.

HELENE (1997) ressalta que a vida útil das estruturas depende do desempenho dos elementos e componentes estruturais propriamente ditos e dos demais componentes e partes da obra. Esses demais componentes, incorporados à estrutura, tais como drenos, juntas, aparelhos de apoio, instalações, pingadeiras, rufos, chapins, impermeabilizações e revestimentos, dentre outros, apresentam vida útil, geralmente, menor que a do concreto, exigindo previsões adequadas para suas substituições e manutenções, já que estão ali para proteger a estrutura do concreto. Portanto, o conceito de vida útil pode aplicar-se à estrutura como um todo ou às suas partes, sendo diferente em cada caso.

TUUTTI (1982) propõe um modelo simplificado de previsão da vida útil para as estruturas de concreto armado, considerando a degradação devida ao fenômeno de corrosão das armaduras, no qual divide esta vida útil em duas fases: período de iniciação e período de propagação (Figura 1). Este modelo é puramente qualitativo, sendo muito citado devido à sua simplicidade descritiva.



**Figura 1** Modelo de vida útil de TUUTTI (1982)

A duração do período de iniciação é caracterizada por um baixo grau de corrosão, sendo determinada pela velocidade com que a região do cobrimento é modificada pela concentração de agentes agressivos ou redução do pH. De acordo com HELENE (1993), é o período de tempo necessário para que a frente de cloretos ou a frente de carbonatação atinja a armadura e a despasse.

No período de propagação a corrosão da armadura começa a se desenvolver com a formação da pilha eletroquímica, até que chega a um grau de deterioração inaceitável, seja do ponto de vista da segurança, da funcionalidade ou, ainda, da estética (ANDRADE, 2000). Neste período, a velocidade de difusão do oxigênio, a temperatura, e a resistividade da solução dos poros são fatores que exercem grande influência. A deterioração avança, sendo os mecanismos de corrosão existentes os controladores da duração desta etapa (TEIXEIRA, 1998). Entretanto, deve-se salientar que a corrosão das armaduras não é um processo contínuo, podendo ser interrompido a qualquer momento, pela ausência de qualquer fator necessário para que o mesmo continue ocorrendo.

Um grande número de pesquisadores (ANDRADE, 2000a; ANDRADE, 2000b; POULSEN, 1996 e SILVA, 1998, dentre outros) estão voltados para modelagem dos fatores que influenciam a corrosão das armaduras, por ser esta uma das manifestações patológicas que mais ataca as estruturas de concreto armado. A corrosão devido à ação dos íons cloretos, por sua vez, é a pior das corrosões, por sua velocidade e portanto se constitui em uma das principais causas de deterioração precoce, de estruturas de concreto armado (SWAMY et al., 1998).

Muitos modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à ação de cloretos têm sido baseados nos princípios da difusão, que é a principal forma de transporte de cloretos em concretos saturados. Isto porque a permeabilidade ocorre apenas em situações especiais, onde se verifica diferença de pressão, e a absorção capilar só permite a entrada de cloretos a profundidades pequenas, em relação à superfície exposta. Portanto, para que o íon cloreto atinja a armadura, ele se movimenta principalmente por meio de difusão (WAYERS, 1998). Por isso, a maioria dos modelos matemáticos disponíveis para previsão da penetração de íons cloreto no concreto baseia-se na segunda lei de Fick da difusão, definida posteriormente pelas equações 2.4 e 2.5.

As medidas necessárias para estimar a vida útil das estruturas são escolhidas levando-se em consideração as características dos materiais, as condições de exposição e os modelos de deterioração. Porém a determinação da durabilidade e da vida útil das estruturas é extremamente difícil de ser realizada devido ao sinergismo existente entre os diversos fatores que regem as várias formas de degradação.

### 2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE NO CONCRETO

Segundo NEPOMUCENO (1992), o principal fator de deterioração de estruturas de concreto armado é a interação do meio ambiente com o concreto. Esta interação ocorre através da penetração de agentes agressivos pelos poros do concreto. O que determina esse mecanismo de transporte no concreto é a configuração dos poros (tipo e distribuição do tamanho dos poros ou microfissuras) e o



seu preenchimento com água (NEVILLE, 1997), bem como as microfissuras na matriz da pasta de cimento hidratado e da interface pasta-agregado (FIB BULLETINS, 1999).

CASCUDO (1997) também considera que a estrutura porosa da pasta de cimento endurecida é o que influencia decisivamente no transporte de substâncias no interior do concreto. Segundo o autor, a interconexão dos poros determina a porosidade aberta, que possibilita o transporte das substâncias dentro do concreto; já a distribuição do tamanho dos poros interfere na velocidade de transporte.

Os mecanismos de transporte no concreto dependem ainda das características físicas e químicas e da concentração superficial das substâncias que penetram no material, das condições ambientais, do grau de umidificação do concreto e da temperatura (NEPOMUCENO, 1992). Por outro lado, a capacidade de fixação dos íons agressivos por parte do concreto, através de reações químicas ou da adsorção física, reduz o potencial agressivo destes.

O ingresso de fluidos (líquidos e gases) e íons agressivos no concreto ocorre através da permeabilidade (infiltração ou penetração sob pressão externa), difusão (gradiente de concentração), absorção (pressão interna) e da migração (efeito de um campo elétrico) (FIB BULLETINS, 1999). Estes mecanismos podem atuar simultaneamente, ou sucessivamente, ao longo do tempo, dependendo das condições de exposição (temperatura, umidade, dentre outras) a que o concreto esteja submetido. A seguir serão descritos os principais mecanismos de transporte no concreto.

### **2.3.1 Permeabilidade**

A permeabilidade pode ser definida como a facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido, sob um gradiente de pressão externa, sendo determinada pela continuidade e tamanho dos poros na estrutura do sólido (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O mecanismo de penetração de água sob pressão se caracteriza pela existência de um gradiente hidráulico que força a entrada da água no concreto (FERREIRA, 1999). Este tipo de movimentação está diretamente relacionado com a porosidade, e sua determinação se constitui em um mecanismo indireto de medição desta propriedade do concreto.

Os principais fatores que determinam a formação da estrutura de poros e que portanto influenciam a facilidade com que fluidos, líquidos ou gases penetram e se deslocam pelo concreto, sob os mais distintos gradientes de pressão, são o tipo de cimento, a relação água/cimento, o grau de hidratação do cimento, o teor e tipo de adição, a presença de microfissuras ou fissuras (RASHEEDUZZAFAR, 1992).

De acordo com UCHIKAWA, citado por LOPES (1999), a permeabilidade aumenta exponencialmente com o aumento da relação água/cimento e cai bruscamente com a evolução da hidratação. NEVILLE (1997) mostra dados em que o valor do coeficiente de permeabilidade no concreto decresce até 4 ordens de grandeza com a diminuição da relação água/cimento de 0,75 para 0,26, sendo que, no intervalo de variação da relação água/cimento de 0,75 a 0,45, a permeabilidade decresce duas ordens de grandeza. A Tabela 1 mostra valores do coeficiente de permeabilidade em diversas idades de uma pasta de cimento.

**Tabela 1** Relação entre permeabilidade e relação água/cimento para pastas com 93% do cimento hidratado (NEVILLE, 1997)

Idade (dias)	Coefficiente de Permeabilidade - K (m/s)
Fresco	2.10-6
5	4.10-10
6	1.10-10
8	4.10-11
13	5.10-12
24	1,10-12
Final	6.10-13

De acordo com NEVILLE (1997), o gel de silicato de cálcio hidratado apresenta, em média, uma porosidade de 28%, porém os poros são muito pequenos e por isso a permeabilidade ocorre em maior escala através dos poros capilares. Com o decorrer da hidratação do cimento, os poros capilares vão sendo preenchidos pelo gel e assim a permeabilidade diminui, sendo este fenômeno mais pronunciado em concretos com menores relações água/cimento. Segundo HELENE (1993), o coeficiente de permeabilidade pode variar seis ordens de grandeza de 1 a 28 dias, conforme se processa a hidratação do cimento, devido a mudanças na estrutura de poros do concreto durante este período.

Esta situação pode ocorrer em estruturas submersas ou parcialmente submersas.

Para o regime laminar, estacionário e não turbulento, a permeabilidade de água no concreto pode ser modelada pela lei de Darcy, conforme a equação 2.1 (NEVILLE, 1997).

$$V = k \frac{H}{x} = \frac{Q}{S} \quad (2.1)$$

Onde:

V – velocidade de percolação da água, em m/s

k – coeficiente de permeabilidade da água no concreto, em m/s

H – gradiente de pressão da água, em m.c.a.

x – espessura de concreto percolado pela água, em m

Q – vazão de água percolada, em m<sup>3</sup>/c

S – área da superfície confinada por onde percola a água, em m<sup>2</sup>.

A penetração de cloretos no concreto através deste fenômeno é de importância em casos particulares de estruturas marinhas ou estruturas com grande pressão hidrostática, como, por exemplo, reservatórios de água (KROPP, 1995).

### 2.3.2 Absorção capilar

De acordo com PETRUCCI (1987), absorção capilar é o processo físico pelo qual o concreto preenche e retém água nos poros e condutos capilares devido à tensão superficial atuante nestes.

Como o concreto é um material hidrófilo, que tem grande afinidade com a água, torna-se difícil controlar a absorção capilar da água no mesmo. Segundo FERREIRA (1999), a tendência do concreto de adsorver água vai ocasionar, se existir disponibilidade suficiente de água, uma sucção de água para o interior dos poros. Se estes poros forem muito pequenos, este fenômeno poderá provocar um acréscimo na profundidade de penetração, gerando o efeito conhecido como ascensão capilar.

HO e LEWIS (1987) comentam que uma absorção lenta indica a existência de capilares de pequenos diâmetros, com maior profundidade alcançada, o contrário de uma absorção rápida que indica a existência de capilares maiores com menor profundidade atingida e maior quantidade de água adsorvida. O que demonstra que, nas estruturas expostas ao ar, a taxa de absorção de água por absorção capilar serve como um indicativo do transporte de água no concreto. Entretanto, segundo HELENE (1993), o mais importante é a intercomunicabilidade dos capilares, sendo menos relevante o diâmetro desses, pois de acordo com suas constatações, concretos de baixa relação água/cimento têm capilares de menor diâmetro e ao mesmo tempo muito menos intercomunicáveis, resultando em menor absorção de água e, também, menor profundidade de penetração dessa água.

HELENE (1986) observou, em concretos de cimento Portland comum, a 28 dias de idade, alturas ou profundidades de penetração de água por absorção capilar de 2 cm para relação água/cimento de 0,40 e de 6 cm para relação de 0,60, durante um período de 24 horas.

De acordo com HELENE (1993), a absorção capilar pode ser modelada pela lei de Jurin que relaciona a altura de ascensão capilar ao tempo de contato com a água (equação 2.2):

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v \cdot r \cdot t}{\eta}} \quad (2.2)$$

Onde:

$h$  – altura ou penetração da água no capilar, em m

$v$  – tensão superficial da água, em kg/m ( $\approx 75 \cdot 10^{-4}$ )

$r$  – raio do capilar, em m

$\eta$  - viscosidade de água, em kg.s/m<sup>2</sup> ( $\approx 13 \cdot 10^{-5}$ )

$t$  – período de tempo para atingir a penetração  $h$ , em s.

Uma vez que, atingida uma determinada altura de ascensão, pode-se dizer, quando comparada à difusão, que, a partir da saturação, a absorção capilar é de duração limitada, pois as forças capilares passam a ser insuficientes para gerar movimentação do fluido, até que as condições se alterem (CALÇADA, 2000). Segundo a mesma autora, há um limite para o tempo de absorção, a partir do qual a penetração do líquido pára e o ingresso continua por difusão.

O ingresso da água por absorção capilar depende das características do líquido, tais como viscosidade, densidade e tensão superficial, e das características do concreto, como estrutura dos poros (raio, tortuosidade e continuidade dos capilares) e teor de umidade (BAUER, 1995; NEPOMUCENO, 1992). Deve-se considerar o maior ou menor grau de hidratação do concreto. Não há absorção capilar em concretos saturados, pois o concreto deve estar com os poros secos ou parcialmente secos para que seja possível a absorção de água por capilaridade (HELENE, 1993).

A absorção capilar ocorre principalmente em concretos aparentes e naqueles em contato com solos úmidos e ou sujeitos a ciclos de umedecimento. Com relação à penetração de íons cloreto, é o principal mecanismo quando a estrutura está submetida a ciclos de molhagem e secagem. No período de molhagem a superfície absorve rapidamente a solução de cloreto e, no período de secagem, a água evapora e o sal se deposita no concreto. Com os ciclos posteriores há um progressivo aumento da concentração de cloretos na solução dos poros do concreto. Dependendo da umidade relativa do ambiente, o sal reduz a evaporação, aumentando a umidade no interior do concreto, devido a sua higroscopicidade (KROPP, 1995).

### 2.3.3 Difusão de íons

A difusão pode ser entendida, segundo SILVA FILHO (1994), como o mecanismo pelo qual o fluido se movimenta em função da existência de um diferencial de potencial químico (o fluxo da substância que difunde tende a igualar as concentrações) ou de um gradiente de temperatura/umidade

e, ao contrário dos mecanismos de transporte anteriores, não depende do fluxo de fluidos. Durante o fenômeno, a substância se difunde em uma direção de forma a igualar as concentrações, eliminando o gradiente. Quando o gradiente se mantém através da entrada e saída contínua da substância no sentido do extremo de maior concentração para o de menor, obtém-se um fluxo contínuo, ou também chamado estado estacionário.

Este fenômeno ocorre tanto para substâncias presentes em meio líquido como para aquelas em meio gasoso. Os dois principais agentes agressivos que comprometem as armaduras, o CO<sub>2</sub> e os íons cloreto, têm sua penetração controlada principalmente por este fenômeno. Entretanto, como o enfoque dado neste trabalho é para a penetração de cloretos, apenas o fenômeno que ocorre em meio líquido será discutido.

No concreto, a difusão ocorre devido ao contato íntimo da solução presente nos poros com o meio ambiente, sendo o fenômeno mais intenso quanto maior a sua concentração na solução externa (MONTEIRO, 1996).

Fick foi o primeiro, em 1855, que realizou uma adaptação da equação empírica de Fourier, de condução do calor, ao fenômeno da difusão. O mesmo definiu que o fluxo de uma substância através de um meio é diretamente proporcional ao produto da difusividade pelo gradiente de concentração, medido na direção perpendicular à seção do fluxo (equação 2.3) (TUUTTI, 1982).

$$J = -D_{eff} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.3)$$

Onde:

J – fluxo da substância, em mol/(cm<sup>2</sup>.s);

D<sub>eff</sub> – coeficiente efetivo de difusão, em cm<sup>2</sup>/s;

$\frac{\partial c}{\partial x}$  – gradiente de concentração na direção do fluxo, em mol/cm<sup>4</sup>

O sinal negativo indica que o fluxo ocorre no sentido oposto ao aumento da concentração. Esta equação é chamada de primeira lei de Fick e se aplica para fenômenos de difusão em estado estacionário, para o cálculo do coeficiente efetivo de difusão (D<sub>eff</sub>). Quando esta condição não é atendida, ou seja, para o estado não estacionário, que contempla o fluxo variável com o tempo e a profundidade de penetração, recorre-se à segunda lei de Fick, para o cálculo do coeficiente aparente de difusão (D<sub>a</sub>) (equação 2.4):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_a \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

A solução para a equação 2.4 é dada pela equação 2.5.

$$\frac{C - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_a \cdot t}}\right) \quad (2.5)$$

Onde:

C – concentração na profundidade considerada

$C_0$  – concentração inicial do agente agressivo que penetrou no interior do concreto

$C_s$  – concentração do agente agressivo na superfície do concreto, admitida constante

erf – função do erro de Gauss

x – profundidade considerada, geralmente em m

$D_a$  – coeficiente aparente de difusão, geralmente em  $m^2/s$

t – tempo considerado, geralmente em s.

Pode-se utilizar esta lei para prever a vida útil de um elemento de concreto armado pois, conhecendo-se parâmetros como C,  $C_0$ ,  $C_s$  e  $D_{eff}$ , é possível estimar em quanto tempo (t) os agentes agressivos alcançarão a armadura. Outra informação importante, que pode ser obtida, é o tempo (t) necessário para que a concentração de cloretos (C) alcance a concentração limite para que haja corrosão (ANDRADE, 2000). Segundo CABRAL (2000), existem outras formulações mais recentes para se modelar a penetração de agentes agressivos para o interior do concreto, mas a segunda lei de Fick é utilizada em função da sua extrema simplicidade de resolução matemática e devido a sua consagração, quando comparada às demais formulações propostas, que ainda necessitam de validações mais consistentes.

Entretanto, estas leis são válidas para materiais homogêneos, com poros contínuos, que não reagem com o íon em movimento e não mudam com o tempo (DHIR et al., 1998). Para estudar o fenômeno da difusão em materiais porosos é necessário conhecer a sua estrutura de poros. No caso do concreto, um material com estrutura de poros complexa, esse estudo torna-se difícil. Por isso os estudos da difusão nesse tipo de material, em geral, sofrem alguma simplificação como, por exemplo, considerar os poros como simples capilares cilíndricos (FRANCINETE JR. e FIGUEIREDO, 1999).

Para que ocorra a difusão iônica no concreto é necessário um certo teor mínimo de umidade, que permita a movimentação do íon, assim quando o mesmo encontra em seu caminho uma região seca a difusão é interrompida. A difusão iônica é mais efetiva quando os poros da pasta de cimento hidratado estão saturados, mas também ocorre em concretos parcialmente saturados (NEVILLE, 1997).

Quando os poros do concreto estão totalmente saturados de água e o sistema está submetido a baixas pressões, o processo de ingresso predominante é o mecanismo de difusão dos cloretos, podendo-se considerar neste caso um estado de difusão pura (ANDRADE et al. citados por GUIMARÃES, 1997).

Conforme HELENE (1993), as adições aumentam a resistência do concreto à penetração de cloretos. Outro fator de alteração da difusividade está relacionado com as características do cimento, devido ao fato de parte dos cloretos reagir com certos compostos da hidratação do cimento, retendo-os. Segundo NEVILLE (1997), deve-se notar que o coeficiente de difusão varia com a idade, porque o sistema de poros do concreto varia com o tempo, especialmente com a evolução de hidratação do cimento.

O coeficiente de difusão depende de vários fatores. Alguns já foram citados acima, tais como o tipo de cimento; a incorporação de adições no concreto; o grau de saturação dos poros, influenciando o grau de saturação dos poros, podendo ser citados também a porosidade, a natureza do líquido que difunde, a temperatura, a relação água/cimento e o tipo de cátion presente na solução do poro (HELENE, 1993). De acordo com NEVILLE (1997), o aumento da relação água/cimento pode representar um aumento da difusividade, porém esta influência é bem menor no processo de difusão do que nos outros mecanismos de penetração de cloretos.

Outro fator importante é que, como os íons são carregados eletricamente, durante o processo de difusão há movimentação de outros íons para que a neutralidade elétrica seja mantida. Por isso podem ocorrer trocas iônicas entre a solução dos poros e a superfície do concreto. Segundo KROPP (1995), à medida que a solução seja, respectivamente, de cloreto de sódio, cloreto de cálcio ou cloreto de magnésio, a taxa de difusão cresce. Para GJØRV et al. (1994) a troca no tipo de cátion, por exemplo de sódio para cálcio, na solução fonte de cloreto, pode aumentar a taxa de penetração de cloreto, portanto, o coeficiente de difusão obtido de diferentes tipos de solução de sal não são comparáveis.

#### **2.3.4 Migração de íons**

O mecanismo de migração é um processo de transporte forçado de íons pela ação de um campo elétrico. Este campo elétrico pode ser oriundo da deflagração de pilhas de corrosão eletroquímicas ou de uma diferença de potencial gerada por uma fonte externa (HELENE, 1993). Durante este fenômeno, os íons cloreto (com carga eletronegativa) se movem no sentido da armadura, desde que a mesma esteja polarizada positivamente (BAUER, 1995).

O transporte de massa, neste caso, obedecerá a lei de Faraday (HELENE, 1993), descrita na equação 2.6.

$$m = \frac{i \cdot t \cdot a}{n \cdot F} \quad (2.6)$$

Onde:

m – massa do metal corroído, em g

i – corrente elétrica em A

t – tempo em s

a – massa atômica

n – valência dos íons do metal

F – constante de Faraday (96.493C)

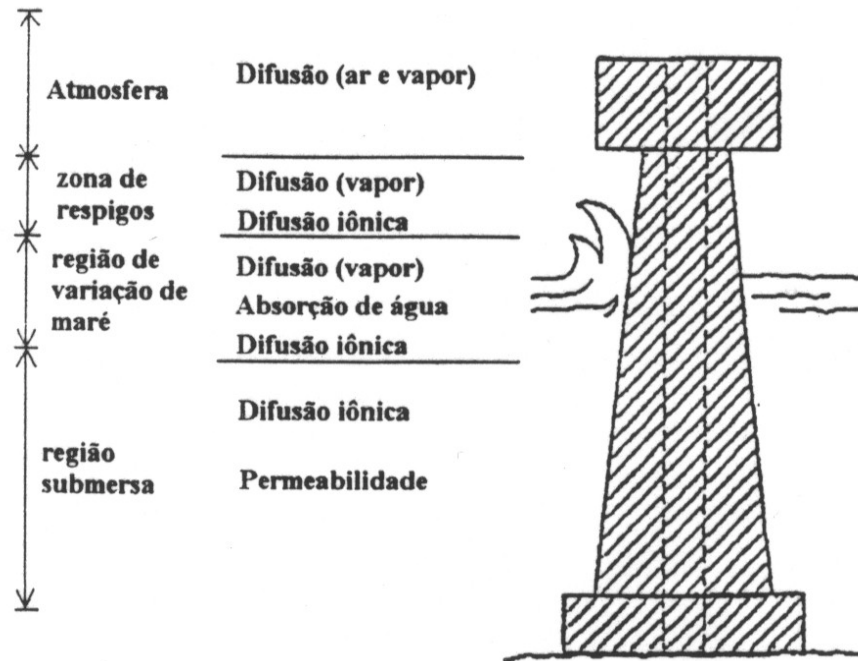
A maior ou menor resistência à migração de íons cloretos está vinculada aos fatores que influenciam na penetração de cloretos.

### 2.3.5 Mecanismos combinados

Segundo HELENE (1993), as maiores penetrações de cloreto são observadas onde os mecanismos de penetração de cloretos podem atuar simultaneamente. Este autor, citando GALLUPO (1985), apresenta uma proporção de 1:3:10 para situações onde ocorre difusão pura, difusão associada à absorção capilar e os três mecanismos de penetração em conjunto, respectivamente.

De acordo com GUIMARÃES (1997), geralmente a difusão pura ou a permeabilidade pura só acontecem em estruturas saturadas, onde as forças capilares não podem atuar. Já para o concreto seco ou não saturado, a sucção capilar é o fenômeno predominante. A Figura 2 ilustra como uma mesma peça estrutural pode estar sujeita a diferentes mecanismos de transporte.





**Figura 2** Atuação simultânea de diversos mecanismos de transporte em uma estrutura marítima (*Concrete Society Working Party* apud PERRATON et al., 1992)

#### 2.4 CORROSÃO DA ARMADURA NO CONCRETO

Como indicado no capítulo 1, o problema de corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado vem sendo alvo de muitos estudos (HELENE, 1993; BAUER, 1995; FIGUEIREDO, 1994; MONTEIRO, 1996; TEIXEIRA, 1998, dentre outros) por ser um fenômeno que, além de apresentar um grande índice de ocorrência, pode reduzir significativamente a vida útil das estruturas, ocasionando conseqüências negativas para a estabilidade, funcionalidade e estética das estruturas.

MAGALHÃES et al., citados por HELENE (1993), estudaram 145 viadutos de concreto em São Paulo e concluíram que 58% deles apresentavam corrosão. ANDRADE (1997) constatou, através de levantamento das manifestações patológicas, no estado de Pernambuco, que 64% destas eram devidas à corrosão da armadura. ARANHA (1994) levantou dados apontando que a corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado é a mais freqüente manifestação patológica, correspondendo a aproximadamente 43% do total das manifestações patológicas encontradas em 348 obras inspecionadas na região amazônica, no período de 1976 a 1993.

A importância do estudo da corrosão também está relacionada com aspectos econômicos, uma vez que os custos com reparos são extremamente altos. De acordo com ULLER et al., citados por TEIXEIRA (1998), os custos de recuperação da metade das 575.000 pontes dos Estados Unidos, afetadas pela corrosão de armaduras, ultrapassam 50 bilhões de dólares. De acordo com VILLARINO

et al. (1995), os problemas causados pela corrosão são tão severos que as vezes prefere-se demolir a estrutura a realizar o reparo necessário, que normalmente tem um elevado custo econômico.

O processo de corrosão das armaduras no interior do concreto ocorre basicamente por mecanismos eletroquímicos, ou seja, há uma reação química que envolve a condução de cargas (elétrons) entre regiões diferentes de um mesmo metal. Em uma região ocorrem as reações de perda de elétrons (região anódica), enquanto em outra se processam as reações de consumo de elétrons (região catódica). A circulação de íons ocorre pelo eletrólito, que no caso do concreto é a solução contida nos seus poros. Na região anódica ocorrem as reações de oxidação do metal, que consiste na dissolução do átomo metálico ou na liberação de íons metálicos para o eletrólito e estabelecimento de um fluxo de elétrons através do eletrodo (metal) para a região catódica. Na região catódica ocorrem as reações de redução dos íons presentes no eletrólito (GONZÁLEZ et al., 1993). Em outras palavras, os íons de ferro ( $Fe^{++}$ ), com carga elétrica positiva no ânodo, passam para a solução, enquanto os elétrons livres ( $e^-$ ), com carga elétrica negativa, passam pelo aço para o cátodo, onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito e combinam-se com a água e o oxigênio para formar os íons de hidroxila ( $OH^-$ )(GENTIL, 1996).

Na região anódica (corroída) a reação que ocorre é a dissolução do ferro (oxidação), descrita na equação 2.7 (ANDRADE, 1992).



A reação catódica, expressa pelas equações 2.8 e 2.9, dependerá, para ocorrer, da disponibilidade de oxigênio e do pH próximo à superfície do metal (ANDRADE, 1992).



Em condições normais, a armadura no interior do concreto encontra-se protegida química e fisicamente. A proteção química é fornecida pela fase aquosa, contida nos poros, pois esta possui alta alcalinidade, o que favorece a formação de uma camada de óxidos de ferro estáveis, compacta e aderente sobre a superfície do aço, chamada de camada de passivação. A proteção física se deve à barreira que o concreto de cobertura exerce à penetração de agentes agressivos desencadeadores da corrosão, tais como os íons cloreto, o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e o oxigênio (ACI 222, apud FRANCINETE JR. e FIGUEIREDO, 1999).

Essa situação de proteção em que se encontra a armadura no interior do concreto pode durar indefinidamente, desde que o concreto apresente boa qualidade e não fissure, o que facilitaria o ingresso de agentes agressores, e que o mesmo não tenha suas características físicas ou mecânicas

alteradas devido à ação de agentes agressivos. Entretanto, por apresentar uma estrutura porosa, o concreto não funciona como uma barreira perfeita contra a penetração dos agentes desencadeadores e propagadores da corrosão, chegando-se à conclusão de que, dentro de algum tempo, a armadura será atacada e o processo de corrosão iniciará (ANDRADE, 1992).

Iniciada a corrosão da armadura, a resistividade elétrica do concreto e o acesso de oxigênio até a superfície da armadura são os principais fatores controladores do processo. A resistividade controla a mobilidade dos íons, dificultando a sua circulação, enquanto que a ausência de oxigênio próximo à superfície do aço interrompe todo o processo, já que, sem oxigênio, as reações catódicas não ocorrem (FRANCINETE JR. e FIGUEIREDO, 1999). Segundo HELENE (1993), um maior teor de cloretos, assim como uma maior mobilidade destes por ação do campo eletroquímico gerado pela pilha de corrosão, também pode acelerar a velocidade de corrosão. Ainda, de acordo com o autor, as características e propriedades do concreto de maior interesse para o estudo da velocidade do processo de corrosão eletroquímica das armaduras são a resistividade elétrica do concreto, o coeficiente de difusão de cloretos e os parâmetros de dissolução e difusão do oxigênio na solução aquosa dos poros do concreto.

A corrosão conduz à formação de óxidos/hidróxidos de ferro, produtos de corrosão avermelhados, pulverulentos e porosos, denominados ferrugem, e só ocorre com a existência de um eletrólito, uma diferença de potencial, oxigênio, podendo ainda existir agentes agressivos (HELENE, 1986).

Segundo GONZÁLES et al. (1996), os produtos finais da corrosão possuem um volume maior que o aço original, o que pode acarretar tensões internas elevadas, gerando fissuração e destacamento do revestimento do concreto. Os efeitos sobre a estrutura afetam o aço, pela redução da seção e decréscimo da resistência mecânica, e o concreto, pela fissuração, aparecimento de manchas de ferrugem e destacamentos do revestimento, resultando também na perda da aderência entre ambos.

A corrosão pode ser acelerada por agentes agressivos contidos ou absorvidos pelo concreto, entre eles pode-se citar os íons sulfetos ( $S^{2-}$ ), os cloretos ( $Cl^-$ ), os nitritos ( $NO_2^-$ ), o gás sulfídrico ( $H_2S$ ), o cátion amônio ( $NH_4^+$ ), os óxidos de enxofre ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ), fuligem, dentre outros. Esses agentes não permitem a formação ou quebram a película existente de passivação do aço, acelerando a corrosão (HELENE, 1986).

Os íons cloretos são considerados os agentes mais problemáticos no processo de corrosão de armaduras, tanto no que diz respeito ao período de iniciação quanto ao de propagação. Portanto, na

seqüência, será dado um enfoque maior à questão do comportamento dos cloretos no concreto armado.

É interessante notar porém que, uma vez que água, oxigênio e íons cloreto desempenham papéis importantes no processo de corrosão das armaduras e de fissuração e deterioração do concreto, a porosidade do concreto passa a ser um fator crítico que controlará os vários processos envolvidos no fenômeno (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Uma boa cura também apresenta uma certa influência sobre a corrosão, e seu efeito é notado principalmente na região do cobrimento (NEVILLE, 1997).

## 2.5 AÇÃO DOS ÍONS CLORETOS

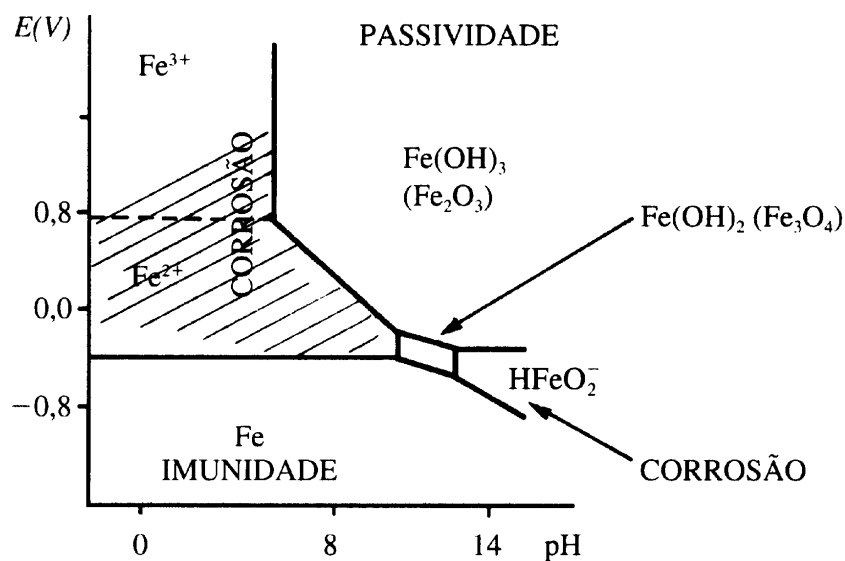
Alguns autores afirmam que a penetração de íons cloreto é a principal causa da corrosão (MANGAT e MOLLOY, 1994; SWAMY et al., 1998; VILLARINO et al., 1995, dentre outros). Este fenômeno é apontado por DELAGRAVE et al. (1996) como a causa mais importante da degradação de 800.000 pontes de concreto armado em todo o mundo.

Segundo PREZZI (1996), diversos fatores podem desencadear a corrosão das armaduras, entre eles a exposição a ambientes ácidos, comuns em estruturas industriais, a carbonatação, a ação de bactérias e a penetração de cloretos. Com exceção do último fator, todos os demais atuam reduzindo a alcalinidade natural do concreto, causando a dissolução da camada passivante que protege a armadura da corrosão. Entretanto, os íons cloreto são especialmente agressivos, pois são capazes de despassar a armadura mesmo em condições de pH extremamente elevado (TEIXEIRA, 1998).

O caráter básico do concreto é dado pela solução, altamente alcalina, presente nos poros do mesmo, a qual possui um pH que varia de 12 a 14. Esta solução alcalina juntamente com uma certa quantidade de oxigênio protege o aço contra agentes agressivos. De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), essa alcalinidade da solução dos poros é devida à existência de grandes concentrações de íons Na, K e OH<sup>-</sup> no fluido dos poros da pasta de cimento e, também, à formação do hidróxido de cálcio durante a hidratação do cimento.

As armaduras nas estruturas de concreto armado encontram-se protegidas pela elevada alcalinidade do meio em que estão inseridas e por uma barreira física que é o cobrimento. De acordo com GENTIL (1996), observa-se no Diagrama de Pourbaix (Figura 3), para o ferro, que este material, por estar em um meio com um pH da ordem de 12, fica passivado por uma película de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ou Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou pela mistura desses dois óxidos, dependendo do potencial de corrosão das armaduras. Porém, este

equilíbrio pode romper-se quando o pH do concreto aumenta ( $> 13$ ) ou é reduzido ( $< 8$ ) (NEPOMUCENO, 1992).



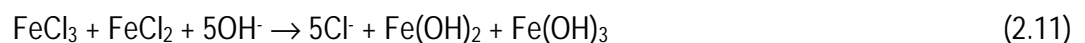
**Figura 3** Diagrama simplificado de Pourbaix para o sistema Fe-H<sub>2</sub>O (GENTIL, 1996)

Essa ruptura da capa passiva, formada de óxidos, pela ação dos íons cloreto, se dá localmente, ou seja, a presença destes íons provoca uma dissolução pontual desta película e, dada a presença de água e oxigênio, facilita o início do processo corrosivo. Esta ruptura da camada protetora de passivação pelos cloretos gera pequenas áreas ativas, com um pH muito baixo, em torno de 3, que funcionam como ânodo e nas quais, o metal é dissolvido. Nas proximidades há a zona catódica, de elevado pH, em torno de 13,5, onde ocorre a redução do oxigênio (NEPOMUCENO, 1992). Vale ressaltar que os íons cloreto não são consumidos nas reações de corrosão, permanecendo sempre presentes.

De acordo com NEVILLE (1997), o íon cloreto é um destruidor de filme passivante sem igual, pois não se observou comportamento tão agressivo para outros íons. HELENE (1993) mostra três teorias apresentadas pelo comitê 222 do ACI para explicar o comportamento dos íons cloreto no que diz respeito à corrosão das armaduras no concreto, descritas a seguir:

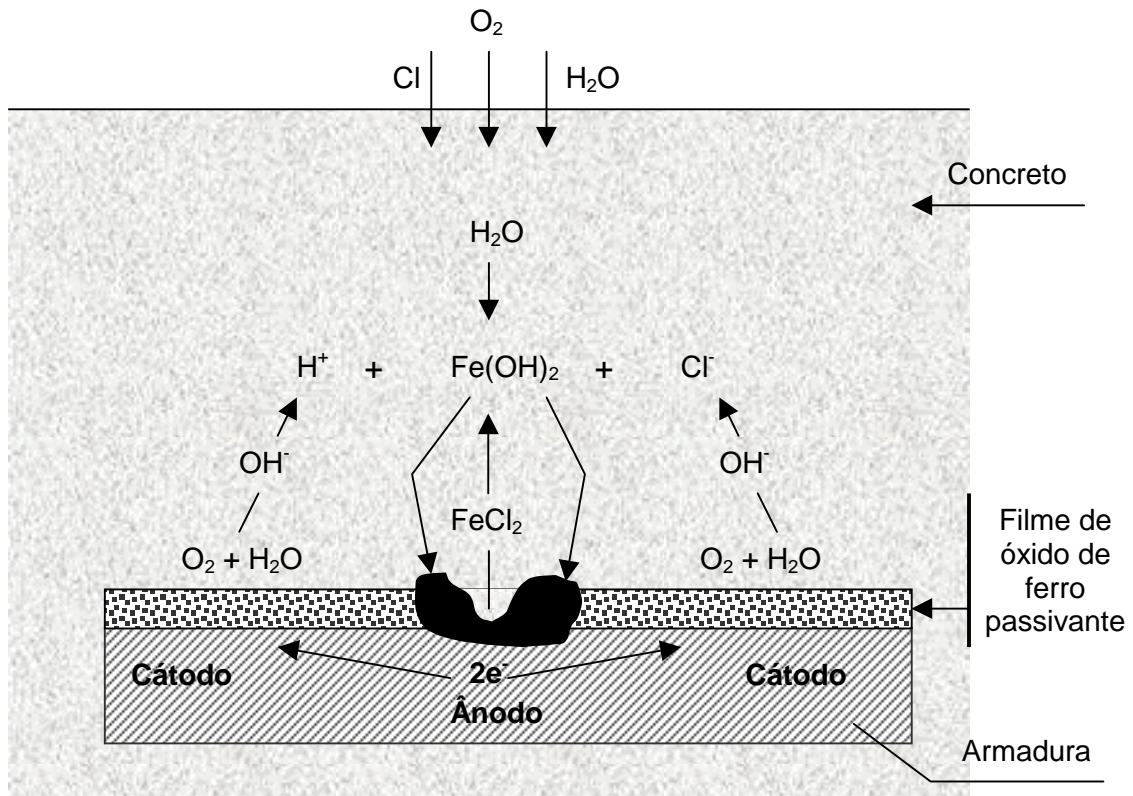
- a) Teoria do filme óxido: esta teoria postula que o íon cloreto se infiltra nas falhas do filme óxido passivante com maior facilidade que outros íons, em função do seu pequeno raio atômico, e é capaz de dispersar coloidalmente o filme passivante, permitindo o ataque da armadura.

- b) Teoria da adsorção: nesta teoria admite-se que o íon cloreto está adsorvido na superfície do metal, competindo com íons hidroxila e com oxigênio dissolvido. Então o cloreto promove a hidratação e subsequente dissolução do ferro em cátions.
- c) Teoria do complexo transitório: segundo esta teoria os íons cloreto competem com as hidroxilas para produção de íons ferrosos pela corrosão. Forma-se, então, um complexo solúvel de cloreto de ferro (complexo transitório). Este composto difunde-se permitindo a continuação da corrosão. A certa distância do eletrodo, o complexo transitório é rompido, havendo precipitação de hidróxido de ferro e o íon cloro fica livre para transportar mais íons ferro. Assim, o cloreto não é consumido durante a corrosão e por este motivo atua como catalisador do processo. Pode, também, ocorrer combinação do cloreto com íons hidrogênio, produzindo acidificação localizada, o que também promove o processo corrosivo. As reações químicas aqui envolvidas são apresentadas nas equações 2.10, 2.11 e 2.12.



De acordo com CASCUDO (1997), a primeira teoria parece estar relacionada à iniciação da corrosão e as outras duas à sua propagação. Portanto, o íon cloreto, além de despassivar a armadura, ainda acelera o processo corrosivo à medida que participa das reações de formação dos produtos da corrosão. Ainda, segundo GENTIL (1996), a corrosão por íons cloreto é do tipo por pite, induzindo à formação de falhas de pequena extensão, porém de grande profundidade, sendo de alta gravidade.

De acordo com LIMA (1990), o íon cloreto, por apresentar um pequeno raio atômico (3,6Å), penetra com maior facilidade do que os outros íons na película passiva através dos pontos fracos, dissolvendo coloidalmente esta película, aumentando sua permeabilidade, rompendo a passividade em pequenas regiões, originando os pites. Além disso, o cloreto é bom condutor de corrente elétrica, pois tende a conservar mais umidade, tornando a solução dos poros menos resistiva, o que ajuda a acelerar a corrosão (HELENE, 1986; MEHTA e MONTEIRO, 1994). Na Figura 4 apresenta-se um esquema da atuação do cloreto na corrosão das armaduras do concreto.



**Figura 4** Esquema da corrosão por pites com atuação dos íons cloreto (THOMPSON et al., 1988)

O tempo que os cloretos levam para chegar até a armadura, denominado “período de iniciação” no modelo de Tuutti (descrito no item 2.2), dependerá, principalmente, da concentração de cloretos no meio externo, da natureza do cátion que acompanha o cloreto, da qualidade do concreto (tipo de cimento, proporção de aluminato tricálcico, relação água/cimento, dentre outros), da temperatura, da abertura e da quantidade das fissuras (ANDRADE, 1992). E a destruição do metal aumentará com o aumento da concentração de cloretos porém, esta elevação é até um determinado limite onde há a estabilização. Entretanto, apenas a presença de cloretos não é suficiente para iniciar o processo de corrosão. Para que este processo se inicie é necessário também a presença de oxigênio e do eletrólito. Como estes normalmente estão disponíveis, a presença do cloreto é determinante. Abaixo discute-se quais as possíveis fontes do mesmo.

### 2.5.1 Fontes de cloretos para o concreto

Os cloretos podem ingressar no concreto através dos materiais utilizados na sua confecção. Pode-se encontrar cloretos em agregados contaminados, principalmente em regiões litorâneas, em águas salobras ou excessivamente cloradas, e até mesmo em cimentos, uma vez que os cloretos contribuem para o aumento das resistências iniciais. Os mesmos podem também ser adicionados involuntariamente ao concreto a partir de alguns aditivos aceleradores de pega, que possuem na sua

composição cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ). Quando este aditivo entrar em contato com a água, a sua dissolução provocará a liberação de íons cloreto que permanecerão na mistura (FIGUEIREDO et al., 1993).

As normas brasileiras não estabelecem um valor limite de cloretos nos agregados para que os mesmos possam ser utilizados na produção de concretos. Porém, a NBR 6118 (1978) estipula um teor limite de 500mg de cloreto por litro de água de amassamento, incluindo neste valor o eventual conteúdo de cloretos nos agregados.

Os cloretos também podem ser provenientes do contato do concreto com o meio externo, tais como atmosferas marinhas, industriais, líquidos contaminados com cloretos, solos salinos, ou ainda, oriundos do uso de sais de degelo (HUSSAIN et al., 1996; HAQUE e KAYYALI, 1995; RASHEEDUZZAFAR, 1992).

Nos casos em que as estruturas já estão prontas, os cloretos do ambiente podem penetrar no concreto através da estrutura de poros capilares contínuos, da zona de interface, caso existam, de fissuras e pelos mecanismos clássicos de ingresso de água e transporte de íons, citados e descritos no item 2.3. Geralmente, a maioria dos problemas gerados pelos íons cloretos são provocados pelo ingresso destes íons provenientes do meio ambiente (HELENE, 1993). Já que os cloretos incorporados podem ser evitados através de um controle tecnológico dos insumos.

Cabe ressaltar ainda que, quando os íons cloretos são adicionados no concreto durante a sua confecção, a reação destes íons com os componentes anidros do cimento se torna mais fácil. Porém, se o cloreto penetrar no concreto após o início de suas reações, restará pouco aluminato tricálcico anidro para reagir com estes íons, podendo ocorrer a despassivação com teores mais baixos de cloreto do que no primeiro caso (BROWNE citado por LIMA, 1990).

Segundo HELENE (1993), o ataque dos cloretos em ambiente marítimo, normalmente, é maior na zona de respingos que na zona de névoa e é maior na zona de maré do que em zona submersa. Em regiões litorâneas, a proximidade do mar faz com que a atmosfera contenha íons cloreto. As partículas de água do mar contendo sais dissolvidos, quando em suspensão na atmosfera, são arrastadas pelo vento e podem depositar-se nas estruturas, podendo o cloreto penetrar por absorção ou difusão. Este fenômeno é fortemente influenciado pelo vento, sendo a região da estrutura voltada para a direção predominante de vento a que apresenta teores mais elevados de cloretos. Os cloretos transportados pelo ar podem percorrer grandes distâncias. Já foram observados casos de transporte de até 2km ou distâncias ainda maiores, dependendo da topografia e do vento (NEVILLE, 1997).



Onde ocorrem invernos rigorosos, como nos países do hemisfério norte, utilizam-se sais ( $\text{CaCl}_2$  e  $\text{NaCl}$ ) como agentes descongelantes de pavimentos, pontes, estacionamentos e calçadas. E à medida que o gelo ou neve derrete produz-se uma solução salina que penetra no concreto. Conforme a solução vai secando, o cloreto vai ficando na camada superficial do concreto e, de acordo com a severidade da secagem, pode ir se formando sal cristalino sobre a superfície. Quando logo após há chuva tem-se uma solução salina que irá ingressar na estrutura. Observa-se então uma exposição a ciclos de molhagem e secagem e a soluções de concentrações diferentes de sal, sendo predominante o fenômeno da absorção capilar. Contudo, de acordo com as condições de umidade, pode haver penetração de cloretos a camadas mais profundas da estrutura pelo processo de difusão iônica (KROPP, 1995).

É importante ressaltar que outras estruturas que não sofreram a deposição direta dos sais podem ser contaminadas por estes, pois os veículos, ao passarem na estrutura onde ocorreu a aplicação de sais de degelo, carregam em suas rodas a solução salina, podendo virem a depositá-la em outro local. Estruturas adjacentes também podem ser contaminadas com respingos da solução salina quando da passagem de veículos (KROPP, 1995).

No Brasil, a limpeza de fachadas e pisos cerâmicos com ácido muriático, composto por ácido clorídrico, prática incentivada pelos produtores de peças cerâmicas de revestimento, é uma das principais causas da contaminação do concreto com cloretos em regiões distantes do mar (HELENE, 1993).

Outra forma de ingresso de cloretos no concreto é quando há decomposição do PVC (policloreto de vinila), provocando a formação de ácido clorídrico gasoso. Esta decomposição tem início em temperaturas entre 80 a 90°C e a formação deste ácido cresce com o aumento da temperatura, chegando à decomposição total em 300°C. Quando o gás entra em contato com superfícies de temperatura inferior ele se condensa e se a superfície for de concreto este ácido pode combinar-se com os componentes do concreto formando o  $\text{CaCl}_2$ , que entrando em contato com água se dissolve e pode penetrar no concreto por absorção capilar ou difusão (KROPP, 1995).

Portanto, diversas fontes de cloretos podem ser responsáveis pela contaminação de estruturas de concreto armado.

### **2.5.2 Tipos de cloreto no concreto**

Os cloretos presentes no concreto podem ser encontrados fixos aos produtos de hidratação, seja por adsorção física ou por combinação química, ou livres, dissolvidos na solução dos poros do

concreto. Os íons que efetivamente contribuem para a corrosão, bem como para o transporte de cloretos no concreto, são os íons livres.

Os cloretos encontrados na forma de cristal sólido (ou fixos) não representam riscos elevados para as estruturas, pois não podem penetrar na porosidade do concreto, por terem dimensões muito maiores que a dos poros. Os mesmos podem depositar-se por impactação na superfície do concreto e aí permanecerem até que a água os dissolvam, tornando-o livre, podendo então ocorrer o transporte para o interior da estrutura (HELENE, 1993).

De acordo com ALONSO e ANDRADE, citados por ISAIA (1995), os maiores responsáveis pela fixação dos cloretos são as fases aluminato do material cimentante, em particular o aluminato de cálcio hidratado, embora para formação do sal de Friedel (ou monocloroaluminato de cálcio hidratado) até 0,4% do teor total possa também se combinar com o  $C_3A$  da fase não hidratada do cimento (SCHIESSL citado por ISAIA, 1995). Para HELENE (1993), a geração do Sal de Friedel, composto formado da combinação química de íons cloreto com o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), e a adsorção dos mesmos ao C-S-H retardam a difusão destes no concreto, além de reduzir a quantidade de cloretos livres, contribuindo para a manutenção da passivação do aço. RASHEEDUZZAFAR (1992) encontrou uma redução da quantidade de cloretos livres de 41% para 12% quando o teor de  $C_3A$  do cimento aumentou de 2% para 12%. Por outro lado, deve-se entretanto chamar atenção para o fato de que teores elevados de  $C_3A$  tornam o concreto mais vulnerável ao ataque por sulfatos.

Não se pode afirmar que o único parâmetro a influenciar na capacidade de retenção de cloretos seja o conteúdo de  $C_3A$ , pois outros produtos de hidratação parecem ser capazes de fixar um determinado valor de cloretos. Segundo TUUTI (1982), a soma das fases  $C_3A + C_4AF$  é a que melhor se correlaciona com a capacidade de fixação de cloretos. Também os silicatos de cálcio são capazes de fixar íons cloreto. O mecanismo neste caso é diferente do que acontece com o  $C_3A$ , ocorrendo por adsorção física através de forças da superfície (NEVILLE, 1997).

Cabe ressaltar, quanto ao possível uso de cimento com elevado teor de  $C_3A$ , a grande quantidade inicial de calor de hidratação desprendido e conseqüente elevação da temperatura, deste tipo de mistura, o que pode ser prejudicial em obras com grandes massa de concreto, como é o caso de muitas estruturas expostas ao mar (NEVILLE, 1997).

Outro ponto importante que deve ser levado em consideração é o tipo de cátion que acompanha o íon cloreto. De acordo com PREZZI et al. (1996), a quantidade de cloretos livres é maior quando proveniente da dissociação do NaCl do que do  $CaCl_2$ .

As pozolanas, em particular as cinzas volantes e as escórias de alto forno, são adições que apresentam boa capacidade de fixação de cloretos, por apresentarem teores elevados de alumina em sua composição (ISAIA, 1995). Em geral, as adições minerais que possuem teores de aluminatos em sua composição, quando substituem parte do cimento, promovem alterações na estrutura de poros, na composição da solução aquosa e na capacidade de fixação dos íons cloreto, reduzindo o teor de cloreto livre. Resultados experimentais têm comprovado a redução na penetração de cloretos, em concretos contendo cinza volante (HAQUE e KAYYALI, 1995), cinza de casca de arroz (FERREIRA, 1999), sílica ativa (HOFFMANN, 2001) e escória granulada de alto forno (OLLIVIER, 1998).

Entretanto, alguns pesquisadores (PAGE et al., 1991a; PAGE et al., 1991b; HAQUE e KAYYALI, 1995; RASHEEDUZZAFAR, 1992, dentre outros) constataram que há uma capacidade máxima de fixação de cloretos pelos componentes do cimento hidratado e, que, a utilização de teores superiores de cloreto a esta capacidade implica no surgimento de cloretos livres na solução dos poros. Isto ocorre, provavelmente, porque os íons cloreto se combinam com os hidratos até que estes estejam saturados de cloretos e não mais existam hidratos disponíveis para reagir.

De acordo com ALONSO et al. (1997), uma diminuição do pH influencia a estabilidade dos cloroaluminatos, pois estes são estáveis apenas para altos valores de pH. Uma redução do pH leva à quebra dos cloroaluminatos, o que ocasiona uma liberação de íons cloreto para a solução dos poros, aumentando o potencial agressivo.

Outro fator que influencia a estabilidade dos sais de Friedel é a presença de íons sulfato pois, quando os mesmos são incorporados ao concreto, reagem com o  $C_3A$ , formando sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita), inibindo a formação de cloroaluminatos, e aumentando a concentração de cloretos livres na solução dos poros (HUSSAIN e RASHEEDUZZAFAR, 1994).

A relação entre o teor limite de cloretos livres e o teor de cloretos fixados, conhecida como capacidade de fixação de cloretos, é influenciada por uma série de fatores, entre eles a concentração de cloretos livres na solução dos poros; o tipo, teor e composição química do aglomerante; o tipo e concentração de outras espécies iônicas na solução dos poros; a temperatura ambiente e a existência de camadas superficiais carbonatadas, dentre outros (CALÇADA, 2000).

### 2.5.3 Teor crítico de cloretos

Existe um limite crítico de teor de cloreto capaz de despassar a armadura. Este limite é dado pela relação  $Cl^-/OH^-$  da solução dos poros. A determinação do valor crítico da relação  $Cl^-/OH^-$  depende de fatores como a composição do concreto, o teor de  $C_3A$  do cimento, a temperatura, a umidade

relativa, o pH da solução dos poros, a proporção de cloretos solúveis, o conteúdo de água e a fonte de cloretos, dentre outros (ALONSO et al., 1997).

Devido a esse grande número de fatores, se tem um certa dificuldade em estabelecer um parâmetro seguro para a quantidade limite de cloretos, principalmente para se determinar um valor único da relação crítica de  $Cl^-/OH^-$  (HUSSAIN et al., 1996). O teor considerado como crítico de cloretos pode oscilar entre 0,1 e 1,0% da massa de cloreto total, tomado em relação à massa de cimento, dependendo do país e de alguns parâmetros, como condições ambientais e concentração de cloretos na superfície do concreto, dentre outros (PAGE et al., 1991).

Como dito anteriormente, no item 2.5.2, os cloretos potencialmente agressivos são aqueles que se encontram dissolvidos na fase aquosa do concreto, ou seja, livres. Mas como os combinados podem tornar-se livres, existem normas e especificações para limitar o teor total de cloretos<sup>1</sup> contidos no concreto (BAUER, 1995). Na Tabela 2, HELENE (1993) apresenta os limites para o teor máximo de cloretos no concreto normatizados em diversos países.

**Tabela 2** Limites normatizados para o teor total de cloretos no concreto (HELENE, 1993)

País	Norma	Limite máximo de cloretos		Limite referido a
		Concreto armado	Concreto protendido	
BRASIL	NBR 6118	0,05%	-	Água de amassamento
	NBR 7197	-	0,05%	
	NBR 9062	-	0,05%	
ESPANHA	EH – 88	0,40%	-	Cimento
	EP – 80	-	0,10%	
ESTADOS UNIDOS	ACI 222	0,20%	0,08%	Cimento
	ACI 201	0,20%	0,08%	
	ACI 318	0,30% ambiente normal 0,15% ambiente cloreto 1,00% ambiente seco	0,06%	
EUROPA	CEB	0,05%	0,025%	Concreto
	CEB-FIP	0,40%	0,20%	Cimento
	ENV 206	1,00% concreto simples 0,40%	0,20%	
JAPÃO	JSCE SP-2	0,60 kg/m <sup>3</sup>	0,30 kg/m <sup>3</sup>	Concreto

Como pode ser observado na Tabela 2, o teor de cloretos no concreto é geralmente expresso em porcentagem. Este percentual pode ser em relação à massa do concreto, à massa de cimento, ao volume do concreto ou ao volume da água de amassamento. HELENE (1993) comenta que a

<sup>1</sup> O teor total de cloretos corresponde ao teor de cloretos livres mais o teor de cloretos combinados (ISAIA, 1995).

porcentagem em relação à massa de cimento é a forma mais adequada de apresentar o teor de cloreto, pois o conteúdo de cimento no concreto altera sua capacidade de fixação de cloretos. Além do mais, quando estes teores limites tomam como referência a quantidade de água, têm-se a impressão de que, com o aumento da relação água/cimento, seria possível aumentar a quantidade de cloreto no concreto, o que não é real.

Como limite muito geral, considera-se que 0,4% em relação à massa do cimento, ou 0,05 a 0,1% em relação à massa do concreto, são quantidades suficientes de cloretos para despassivar o aço. Entretanto, pode-se encontrar situações com armaduras corroídas em concretos com teores abaixo desses limites, bem como armaduras não corroídas em concretos com teores muito superiores a esses limites (ANDRADE, 1992).

Portanto, pode-se afirmar que ainda não se chegou a um consenso a respeito do teor crítico de cloretos que pode ser incorporado à massa do concreto para que não haja corrosão, pois há muitas variáveis que influenciam o processo corrosivo.

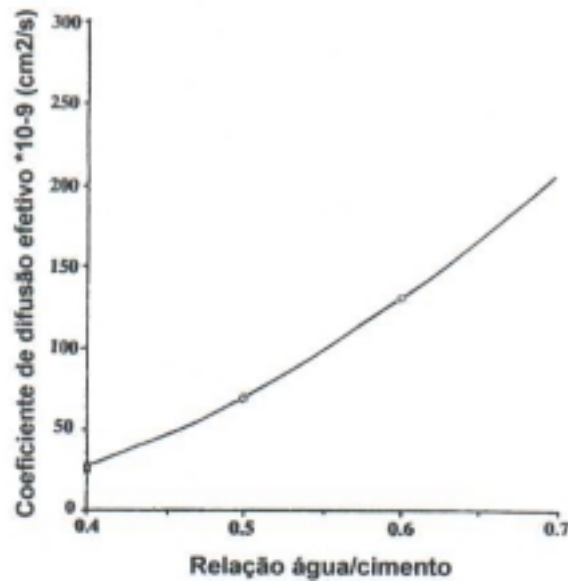
#### **2.5.4 Fatores que influenciam o ingresso de cloretos no concreto**

Existem vários fatores que determinam a capacidade do concreto em resistir à penetração de cloretos. A seguir serão abordados alguns destes fatores.

##### **2.5.4.1 Relação água/cimento**

A relação água/cimento é um dos fatores que exerce grande influência na penetração de cloretos por determinar características como porosidade, capacidade de absorção e permeabilidade da pasta de cimento hidratada (LOPES, 1999). Quanto maior a relação água/cimento, maior será a porosidade e permeabilidade de um concreto e, a princípio, maior será a penetração de cloretos.

Na Figura 5 pode-se ver a influência da relação água/cimento na difusão de íons cloretos em pasta de cimento, onde verifica-se a clara tendência do aumento do coeficiente de difusão de cloretos com a elevação da relação água/cimento, fato justificado pelo aumento da porosidade da pasta.



**Figura 5** Influência da relação água/cimento no coeficiente efetivo de difusão de cloretos em pastas de cimento (MACDONALD e NORTHWOOD, 1995)

SWAMY et al. (1998), estudando a habilidade de proteção que os sistemas de revestimentos de superfície exercem sobre a penetração de cloretos, em lajes de concreto, verificaram que o valor de cloretos, e sua profundidade de penetração, aumentam à medida que se eleva o valor da relação água/cimento de ambos os concretos (revestidos e não revestidos). PLANTE e BILODEAU (1989), analisando o comportamento de concretos confeccionados com relação água/cimento variando de 0,71 a 0,23, encontraram que a penetração dos íons cloreto diminui de 5143 para 1250 coulombs, quase que a terça parte do valor, com a redução da relação água/cimento. IRASSAR et al. (1999) observaram que, em concretos confeccionados com diferentes tipos de cimentos, a penetração de cloretos é maior (cerca de 25%) à medida que a relação água/cimento cresce de 0,4 para 0,6. Os autores atribuem este comportamento devido à maior porosidade capilar.

NGALA et al. (1995), estudando a difusão em pastas, encontraram que o coeficiente de difusão de cloretos diminui, de  $21,46 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$  para  $3,95 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ , com a redução da relação água/cimento de 0,70 para 0,40, devido à influência que a mesma exerce sobre a estrutura de poros. Estudos realizados por outros pesquisadores (PAGE et al., 1991(a); PETTERSSON; 1996, EPERJESI et al., 1998, dentre outros) demonstraram que o coeficiente de difusão decresce com a redução da relação água/cimento. Isto acontece devido a uma maior densificação da pasta pela diminuição do conteúdo de água.

MONTEIRO (1996), pesquisando três tipos de cimentos nacionais (CP II-F, CP III e CP V-ARI-RS, este último contendo adição de sílica ativa), verificou que a redução da relação água/cimento melhorou o desempenho de todos os cimentos, em relação à corrosão das armaduras por cloretos.

Comportamentos semelhantes foram encontrados por MONTEIRO et al. (1999) e MEDEIROS et al. (1999).

FERREIRA (1998), observou que, quando a relação água/cimento, dos concretos moldados com CP IV, aumentou de 0,30 para 0,35, 0,45, 0,60 e 0,80, a penetração de cloretos elevou-se cerca de 17, 135, 177 e 68%, respectivamente. Ainda no mesmo trabalho, a autora constatou que quando a relação água/aglomerante passa de 0,35 para 0,60, em um mesmo teor de adição de cinza de casca de arroz, a carga total passante aumenta 138,9%.

SATO (1998), pesquisando a influência da porosidade na penetração de cloretos, encontrou uma redução de aproximadamente 65% no ingresso destes íons nos concretos produzidos, com a diminuição da relação água/cimento de 0,76 para 0,44, devido à redução da porosidade.

#### 2.5.4.2 Temperatura de cura

A temperatura também altera substancialmente a difusão dos íons cloreto nos poros do concreto. De acordo com REPETTE (1997), a temperatura é um parâmetro muito importante, pois afeta os mecanismos de transporte e a velocidade das reações químicas.

As reações de corrosão, como muitas outras reações químicas, são mais rápidas a temperaturas mais elevadas e há um estímulo à mobilidade das moléculas, portanto o efeito acelerador da temperatura explica porque existem muitos mais concretos deteriorados em regiões litorâneas quentes do que em regiões temperadas (NEVILLE, 1997). Porém, para ambientes secos, a vida útil das estruturas pode aumentar com a elevação da temperatura devido à perda do eletrólito, dificultando a corrosão. Temperaturas elevadas podem também gerar microfissuras de origem térmica, aumentando a permeabilidade do concreto (ISAIA, 1995). Entretanto, a sua diminuição pode dar lugar a condensações no concreto, ocasionando um aumento da umidade do material (HELENE citado por MONTEIRO, 1996).

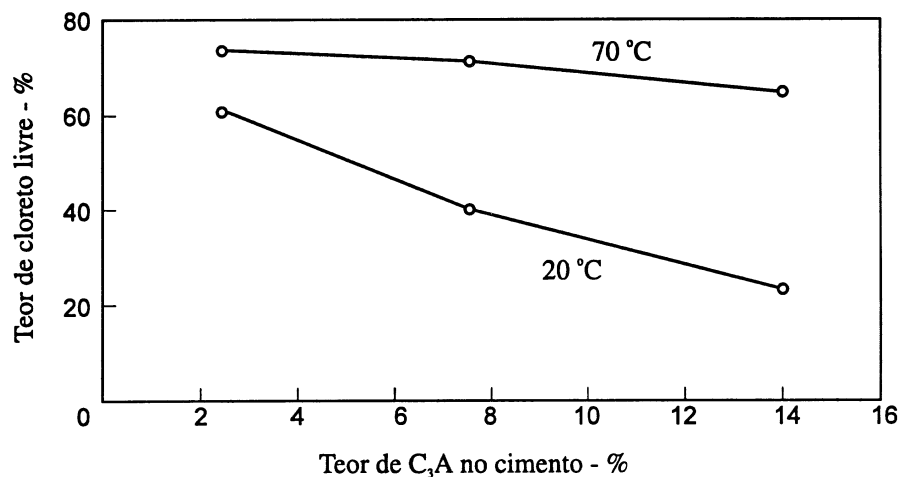
Em um estudo realizado por JONES et al. (1995), em concretos curados em água a 20°C, por um período de 28 dias, o coeficiente efetivo de difusão de cloretos aumentou com a elevação da temperatura de ensaio (-10, 10, 20, 35 e 45°C). Os autores justificam este comportamento devido a maior mobilidade dos íons cloretos a elevadas temperaturas.

DETWILER et al. (1991), pesquisando o efeito de diferentes temperaturas de mistura e cura (5, 20 e 50°C), em concretos com relações água/cimento de 0.40, 0.50 e 0.58 com tempos de cura de 10, 13 e 31 dias, respectivamente, para permitir um mesmo grau de hidratação (de aproximadamente 70%), encontraram que a resistência à difusão de cloretos dos concretos, para uma mesma relação

água/cimento, diminui com o aumento da temperatura de cura, sendo este efeito mais pronunciado em baixas relações água/cimento. Os referidos autores atribuem este fato à estrutura de poros mais grosseira, que se forma no endurecimento inicial do concreto submetido a temperaturas mais elevadas, resultando, portanto, em uma menor resistência à difusão de íons cloretos.

GOWRIPALAN et al. (1990) encontraram que a porosidade das pastas feitas com cimento comum, e cimento com adição de 30% cinza volante e 70% de escória de alto forno, com relação água/cimento de 0,45 e curada em duas temperaturas (21 e 35°C), diminui com o aumento da temperatura. PLATEL et al. (1995) concluíram que concretos preparados em temperaturas acima de 46°C tiveram um significativo desenvolvimento de hidratos, particularmente etringita, dentro dos poros e microfissuras, junto com uma microestrutura geral grosseira.

A temperatura alta também reduz a concentração de  $\text{OH}^-$  na solução dos poros, elevando a relação  $\text{Cl}/\text{OH}^-$ , e aumenta a concentração de cloretos livres pela decomposição de clooroaluminatos (HUSSAIN et al., 1996), além de estimular a movimentação de moléculas e, assim, facilitar o transporte de íons (GOÑI et al. apud FIGUEIREDO, 1994). Na Figura 6, pode-se observar o efeito da temperatura no teor de cloretos livres na água dos poros. Conforme dados dos autores, este comportamento é mais pronunciado em cimentos com alto teor de  $\text{C}_3\text{A}$  e com menor concentração de cloretos na mistura inicial.



**Figura 6** Influência do teor de  $\text{C}_3\text{A}$  na quantidade de íons cloreto livres, a 20 e 70°C (HUSSAIN e RASHEEDUZZAFAR, 1993)

DHIR et al. (1993), analisando o coeficiente efetivo de difusão de cloretos de concretos confeccionados com cinza volante, em teores acima de 20%, submetidos a temperaturas de cura de 10, 20, 35 e 45°C, concluíram que o coeficiente diminui com o aumento da temperatura. Os autores



explicam que isto ocorre devido à aceleração da hidratação com o aumento da temperatura, dificultando assim a passagem dos íons.

Apesar dos trabalhos já realizados sobre a ação da temperatura de cura no concreto, ainda existe uma necessidade de se conhecer, um pouco mais, a influência deste fator na penetração dos íons cloretos.

#### 2.5.4.3 Composição química do cimento e adições

A composição química do cimento tem sua influência relacionada à capacidade de fixação dos íons cloretos que é determinada pelo teor de  $C_3A$  e  $C_4AF$  do clínquer, uma vez que esta fixação ocorre pela reação dos íons cloreto com os aluminatos, formando cloroaluminatos de cálcio e diminuindo assim a quantidade de cloretos livres na solução dos poros.

AL-GAHTANI et al., citados por MONTEIRO (1996), estudando cimentos com elevada alcalinidade, concluíram que eles têm um efeito benéfico e um deletério em relação à penetração de íons cloretos. O efeito benéfico, que em alguns casos ofusca o efeito deletério, é que os cimentos mais alcalinos têm um elevado  $OH^-$ , o que se torna um fator dominante para baixar a relação  $Cl^-/OH^-$  e diminuir a corrosão, mas o fator deletério é que estes cimentos possuem um reduzido teor de  $C_3A$ , ou seja, uma pequena capacidade de retenção de cloretos. Para RASHEEDUZZAFAR (1992), outro fator prejudicial dos cimentos com elevado teor de álcalis são os problemas de durabilidade, de outras origens, que podem ser causados pela reação álcali-agregado.

As diferenças na composição química do cimento existem como uma forma de adequar o concreto às necessidades da indústria da construção. Uma das formas de obtenção de cimentos diferenciados é através da incorporação de adições minerais, que quando misturadas ao clínquer, por ocasião da fabricação do cimento ou por ocasião da execução do concreto, contribuem para provocar alterações nas propriedades químicas e físicas do concreto. Além disso, pode-se obter cimentos diferenciados através da alteração dos teores dos seus compostos principais (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Dependendo do tipo de adição utilizada no cimento, as mesmas apresentam uma influência positiva pois, além de representar uma capacidade adicional de fixação de cloretos, por aumentar a quantidade de aluminatos disponíveis, ainda geram um refinamento dos poros e aumentam a resistência à penetração de agentes agressivos do concreto.

De acordo com HELENE (1997), deve-se dar preferência, quando necessário, a certos tipos de cimento Portland, e a adições e aditivos, que sejam adequados para resistir à agressividade ambiental.

Portanto, para reduzir a penetração de cloretos, são preferíveis os cimentos com adições tipo CP III e CP IV. AL-AMOUDI et al., citados por MONTEIRO (1996), estudando diversos cimentos (cimento Portland sem adição e cimentos com adição de escória de alto forno e cinza volante) quanto ao desenvolvimento da corrosão induzida por cloretos, concluem que os cimentos com adição de escória de alto forno têm desempenho superior aos demais cimentos estudados.

PAGE et al. (1981), estudando o efeito dos cimentos com adição de escória de alto forno, cinza volante, resistente a sulfatos e o comum, constataram que o concreto que apresenta maior coeficiente de difusão de cloretos é o confeccionado com cimento resistente a sulfato seguido em ordem decrescente do cimento comum, o com adição de cinza volante e o de alto forno, devido às mudanças na estrutura de poros que estes cimento proporcionam e dos teores crescente de  $C_3A$ . REGATTIERI et al. (1996), realizando ensaios de penetração de cloretos, segundo as especificações da ASTM C 1202/92, em concretos produzidos com três tipos de cimento (CP I S, CP II F e CP III), chegaram à conclusão que os concretos confeccionados com CP III apresentam os melhores resultados. Isto confirma a idéia de que é preciso controlar o tipo de cimento, já que as adições minerais alteram a porosidade da pasta de cimento endurecida, refinando poros e modificando a distribuição do tamanho de poros.

DAUBE e BAKKER, citados por NEVILLE (1997), mostraram que o coeficiente de difusão de cloreto, em concretos com relação água/cimento de 0,5, contendo teor de escória de alto forno de pelo menos 60% do total do material cimentício, é, aproximadamente, 10 vezes menor do que no concreto com cimento Portland sem adições. Segundo os autores, os efeitos benéficos da escória de alto forno são devidos à microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada, sendo mais espaços dos poros preenchidos com C-S-H do que com cimento Portland sem adições, e do elevado teor de aluminatos presentes no concreto.

A adição de cinzas volantes ao cimento Portland promove uma maior trabalhabilidade, reduz a segregação e a porosidade (LIMA, 1990). Com isso percebe-se um aumento da resistência à penetração de cloretos. Além disso existem aspectos ecológicos e, principalmente, econômicos que fazem com que este tipo de adição se constitua em uma opção tecnológica satisfatória.

MONTEIRO et al. (1999), estudando três tipos de cimentos nacionais (CP II F, CP II Z e CP V), verificaram que o cimento CP II Z obteve um melhor desempenho, apresentando menores teores de cloretos livres aos 56 dias de idade, mostrando um melhor desempenho dos cimentos com adições pozolânicas em relação aos demais cimentos utilizados. Os mesmos autores frisam que, para elevadas relações água/cimento (0,8 a 0,9), a influência do tipo de cimento no controle de penetração de cloretos

é mais evidente ao longo do tempo, pois a reação pozolânica, caracterizada como uma reação lenta, leva a um efeito progressivo de refinamento dos poros, sendo mais significativa com o tempo.

MEDEIROS et al. (1999), comparando o comportamento de três tipos de cimento (CP II F 32, CP II Z 32 e CP IV 32 RS) sob o ponto de vista da proteção à corrosão de armaduras, devido à ação de íons cloreto, notaram um bom desempenho dos corpos-de-prova confeccionados com o cimento CP IV, devido a melhor capacidade de fixação de cloretos, já que este cimento apresentou um teor mais elevado de aluminatos. Para os corpos-de-prova confeccionados com relação água/cimento igual a 0.4, não houve diferença significativa entre os cimentos CP IV 32 e CP II Z.

Além da utilização das adições no cimento, estas também podem ser utilizadas diretamente no concreto. De acordo com NEVILLE (1997), são tão significativos os efeitos benéficos das adições que seu uso em concreto armado, sujeito à corrosão, em climas quentes, é considerado muitas vezes necessário, portanto recomenda-se que o cimento Portland não deveria ser usado puro. Segundo WINCK et al. (2000), os concretos com adição de pozolanas tornam-se menos permeáveis e possuem uma zona de transição mais densa, resultando em uma interface pasta/agregado mais resistente. Além disso, podem apresentar benefícios pela economia, menor consumo de energia, proteção ambiental e conservação dos recursos naturais (ISAIA e HELENE, 1993).

A cinza volante, a escória granulada de alto forno, o metacaulim, a cinza de casca de arroz e a sílica ativa, quando devidamente proporcionadas na mistura, reduzem significativamente a o ingresso de agentes agressivos e aumentam a resistividade do concreto, reduzindo, assim, a velocidade de corrosão. Isso ocorre porque essas adições, em geral, ocasionam a segmentação dos poros maiores, incrementam os locais de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação, acelerando as reações, formando cristais de CH menores e diminuindo o efeito parede na zona de transição entre a pasta e o agregado (NEVILLE, 1997). A ação química (pozolânica) reforça a ação física, segmentando em maior grau os poros e refinando os grãos de CH com o aumento da idade (MEHTA, 1993).

GU et al. (1999) pesquisaram concretos com alto volume de cinza volante e baixa relação água/cimento e constataram que estes concretos obtiveram uma maior resistência à penetração de cloretos em relação a um concreto sem adição. De acordo com LI et al. (1999), a cinza volante nas primeiras idades serve somente como componente inerte, mas com o passar do tempo esta converte, através da reação pozolânica, o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento em silicato de cálcio e aluminatos.

NGALA et al. (1995) estudando o coeficiente de difusão de cloretos em pastas de cimento com adição de 30% de cinza volante e pastas com cimento comum, verificaram que o coeficiente de difusão

de cloretos reduziu de 12,6 para  $0,39 \times 10^{-8}$  cm<sup>2</sup>/s, em pastas com adição de cinza volante e relação água/cimento de 0,40. E atribui este comportamento à produção adicional do silicato de cálcio hidratado (CSH), associada com a reação pozolânica da cinza volante.

PLANTE e BILODEAU (1989), verificando a influência da substituição de cinza volante, sílica ativa e escória de alto forno por cimento, na penetração de cloretos em concretos, encontraram que o concreto com escória de alto forno foi o que apresentou menor penetração de cloretos (935 Coulombs), seguido dos concretos com substituição de sílica ativa (1177 coulombs), cinza volante (3537 coulombs) e do concreto sem substituição (4685 coulombs). Os autores atribuíram este comportamento ao fato da incorporação destes materiais cimentantes/pozolânicos suplementares no concreto contribuem para a redução da porosidade, o que leva à redução na penetração de íons cloretos, e do aumento do teor de aluminatos, o que eleva a quantidade de cloretos fixos, pela maior formação de sal de Friedel, no concreto. Comportamento semelhante foi encontrado por RAMEZANIANPOUR e MALHOTRA (1995), em concretos com adição de escória de alto forno, cinza volante e sílica ativa.

EPERJESI et al. (1998) constataram que os concretos confeccionados com adição de escória de alto forno apresentaram coeficientes de difusão de cloretos, calculados mediante uma expressão simplificada da segunda lei de Fick, menores que os concretos produzidos sem adição. SATO (1998), analisando concretos com adição 70% de escória de alto forno e os sem adição, ambos com relação água/cimento de 0,44, à penetração de cloretos, concluiu que os concretos produzidos com adição obtiveram uma carga passante cerca de 8 vezes menor que a carga passante dos concretos produzidos sem adição, devido à maior fixação dos cloretos e redução do tamanho e da conectividade dos poros.

A sílica ativa tem seu efeito na melhoria da estrutura dos poros da pasta de cimento endurecida, aumentando a sua resistividade, mesmo reduzindo um pouco a reserva alcalina da água dos poros pois a sílica ativa reage com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (NEVILLE, 1997). GJØRV et al. (1994) mostraram que 9% de sílica ativa, em relação à massa de cimento, pode reduzir a 1/5 o valor à difusividade dos cloretos. RASHEEDUZZAFAR (1992), mesmo usando cimento Portland com até 14% de  $\text{C}_3\text{A}$ , em concretos contendo 10% de sílica ativa em relação ao total do material cimentício, encontrou um considerável retardamento, cerca de 3 vezes, no ingresso de íons cloreto nos concretos. JENSEN et al. (1999) verificaram que a adição de 20% de sílica ativa reduziu o ingresso de cloretos, atribuindo este fato a mudanças na estrutura dos poros. BARATA (1998) constatou que a adição de 20% de sílica ativa no concreto, com relação água/cimento de 0,47, reduz a carga passante de 6168,15 para 324,73 coulomb, devido à formação de uma matriz mais densa e homogênea, com menor quantidade de poros interconectados.

Segundo FERREIRA et al. (1998), os concretos produzidos com adição de sílica ativa e cinza de casca de arroz, com o teor de 10%, e relação água/aglomerante de 0,45, apresentaram redução na penetração de íons cloreto de 173% e 42%, respectivamente.

De acordo com IRASSAR et al. (1999), o filer é uma adição mineral que não apresenta propriedades pozolânicas, sendo sua influência na pasta de cimento de natureza física por intermédio de sua finura, que aumenta os pontos de nucleação. Segundo os mesmos autores, este tipo de adição melhora o empacotamento do cimento, dispersa os grãos do clínquer e aumenta o grau de hidratação dos grãos de clínquer. Além de apresentar vantagens ecológicas e econômicas, pois a produção de cimentos com adição de filer calcário requer menos energia de consumo e menor quantidade de recursos naturais, resultando na redução da emissão de CO<sub>2</sub> e na produção de cimento com mesma classe de resistência que os cimentos comuns mas com um custo inferior de investimento (IRASSAR et al., 2000).

Entretanto, resultados de ensaio de penetração de cloretos realizados por WINCK et al. (2000), em concretos com substituição, em massa, de cimento por filer nas proporções de 12,5, 25 e 50%, mostraram que, quanto maior o teor de substituição, maior a penetração de cloretos. A mesma tendência de comportamento foi encontrada por IRASSAR et al. (1998), onde no estudo de concretos com adição de 10 e 20% de filer calcário, os autores encontraram maior penetração de cloretos para os concretos produzidos com filer em relação aos concretos confeccionados sem adição.

Percebe-se, através das pesquisas realizadas com a utilização de adições no concreto ou no cimento, que, as mesmas exercem uma influência benéfica na redução da penetração de cloretos nos concretos. Cabe ressaltar que este efeito benéfico só está relacionado para as adições citadas neste item.

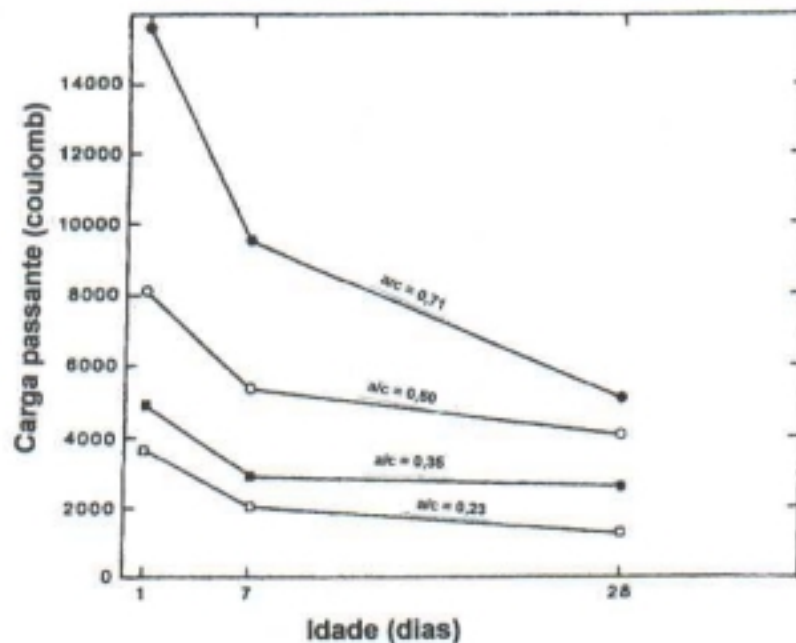
#### 2.5.4.4 Tempo de cura

De acordo com IRASSAR et al. (1999), estudos têm demonstrado que o coeficiente de difusão depende do grau de hidratação do cimento e que este coeficiente reduz à medida que o tempo transcorre.

É fato conhecido que a porosidade da pasta de cimento decresce com o avanço da hidratação do cimento. Com o progresso da hidratação, a porosidade decresce rapidamente, tendo em vista que o volume de gel formado tem aproximadamente 2,1 vezes o volume do cimento anidro, de forma que o gel vai, gradualmente, preenchendo o espaço originalmente preenchido pela água (NEVILLE, 1997).

Devido a este fenômeno, é comum observa-se um acentuado decréscimo, com a idade, na penetração de cloretos em concretos com substituição de cimento por cinza volante, em média a corrente passante decresceu de 1850C para 800C, quando a idade aumentou de 28 para 91 dias (WINCK et al., 2000). ISAIA (1995) e CABRERA e CLAISSE (1990) encontraram comportamento semelhante, e seus resultados mostram que a penetração acelerada de cloretos diminuiu quando aumentou a idade.

Na Figura 7 encontram-se dados de PLANTE e BILODEAU (1989) mostrando a diminuição da penetração de cloretos com o aumento do tempo de cura, em concretos confeccionados com diferentes relações água/cimento, devido à redução da porosidade com o decorrer do tempo.



**Figura 7** Penetração de íons cloretos *versus* o tempo de cura em concretos (PLANTE e BILODEAU, 1989)

MONTEIRO (1996), estudando a influência do tipo de cimento em concretos, constatou que o aumento do período de cura melhora o desempenho de todos os cimentos analisados, principalmente quando se utilizam baixas relações água/cimento. ZHANG e MALHOTRA (1996) analisaram a influência da idade na resistência à penetração de íons cloreto, em concretos confeccionados com relação água/cimento de 0,40, e concluíram que a carga passante diminuiu de 3175 para 1875 coulombs, com o aumento da idade de 28 para 91 dias.

Como visto, a idade é um dos principais fatores que influenciam a penetração dos cloretos no concreto, pois está diretamente relacionada à microestrutura da pasta de cimento hidratada. Portanto,

com a evolução da hidratação a porosidade vai diminuindo e os vazios vão sendo preenchidos pelos compostos, que se formam no decorrer do tempo.

### 2.5.5 Métodos para previsão do ingresso de cloretos no concreto

Como discutido anteriormente, nos últimos anos, inúmeras construções de concreto armado foram deterioradas precocemente pela corrosão das armaduras, fenômeno desencadeado pela penetração de fluidos e íons agressivos no concreto (gás carbônico, oxigênio, cloretos, água). Por isso, há um grande esforço do meio científico em desenvolver e aprimorar ensaios que possam melhor caracterizar a resistência do concreto à penetração dos agentes desencadeadores deste mecanismo de deterioração, especificamente cloretos.

Existem vários métodos que podem dar uma idéia do comportamento do concreto em relação ao ingresso de íons cloretos. Pode-se citar o ensaio de migração de cloretos, proposto por ANDRADE (1993); o ensaio de penetração acelerada de cloretos, normatizado pela ASTM C 1202/92; o ensaio de determinação do teor de cloretos, normatizado pela ASTM C 1152/92; e o de retenção de cloretos, proposto por PAGE e VENNESLAND (1983); dentre outros. Serão discutidos a seguir apenas o de migração, proposto por ANDRADE (1993), e o de penetração acelerada, normatizado pela ASTM C 1202/92, já que estes foram os utilizados no programa experimental desta pesquisa.

#### 2.5.5.1 Ensaio de penetração acelerada de cloretos

Segundo WHITING (1981), devido à necessidade de se avaliar a qualidade dos concretos de tabuleiros de pontes expostos ao efeito dos sais degelantes, surgiu o primeiro teste, no início da década de 80, nos EUA, que empregou um campo elétrico. Este foi denominado "*AASHTO T 277-83 Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete*". Posteriormente, a ASTM corrigiu algumas deficiências do método e normatizou o ensaio, em 1992, com a denominação "*ASTM C 1202 Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*" (HELENE, 1993). O ensaio consiste em colocar um corpo-de-prova de aproximadamente 5 cm de espessura entre dois recipientes. No primeiro coloca-se uma solução de cloreto de sódio, com uma concentração de 3% (célula negativa) e, no outro, uma solução de hidróxido de sódio com concentração de 0,1M. Aplica-se uma voltagem em torno de 60V e mede-se a corrente passante de 30 em 30 minutos, durante um período de 6 horas, associando esse valor à resistência do concreto à penetração de íons cloretos.

Este método tem sofrido críticas (ANDRADE, 1993; GEIKER et al., 1995; SHI et al., 1998, dentre outros) por elevar a temperatura, devido à geração de calor proveniente da alta voltagem (60V), provocando um aquecimento das soluções e do corpo-de-prova (efeito Joule), o que modifica a

velocidade do fluxo dos íons; e por não distinguir o fluxo de cloretos das demais reações que ocorrem simultaneamente. ANDRADE (1993) afirma que a corrente total aferida representa o fluxo de todos os íons presentes na solução dos poros ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ) e não somente o fluxo de cloretos, que a integra.

Outro fator importante a ser considerado é que, quando o disco de concreto é introduzido na célula, antes da aplicação de qualquer campo elétrico, já se tem difusão, principalmente pelos íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), devido à sua alta mobilidade. E quando o campo elétrico é aplicado existe a migração de todos os íons na direção do eletrodo de sinal oposto, ocorrendo difusão e migração simultaneamente. Além disso, os íons cloretos, quando passam pelo concreto, podem reagir com o  $\text{C}_3\text{A}$  e, com isto, o fluxo estacionário não poderia ser alcançado até o término da reação (ANDRADE, 1993).

Conforme ISAIA (1996), o ensaio de penetração de cloretos em concretos produzidos com teores de substituição de 25 e 50% de cinza volante, 10 e 20% de sílica ativa e 10, 20 e 30% de cinza de casca de arroz, especificado pela ASTM C 1202/92, não traduziu com fidedignidade a durabilidade dos concretos pesquisados. Alguns traços, em especial aqueles com teor de pozolana mais elevado, foram os que apresentaram menores valores de carga passante, mas, em contrapartida, apresentaram relações de  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  e coeficientes de carbonatação mais altos, em outros ensaios. Portanto, os resultados dos ensaios, segundo este método, devem ser encarados com reserva, quando forem utilizados para avaliar a durabilidade de concretos com diferentes tipos ou teores de pozolanas, em patamares iguais de resistência.

BARKKER et al., citados por BARATA (1998), também constataram que concretos com reduzidos valores de carga elétrica passante não necessariamente são imunes à penetração de cloretos e à corrosão das armaduras. Para DETWILLER et al. (1991), esse ensaio da ASTM C 1202/92 mede somente a facilidade de mobilidade iônica dos íons cloretos no concreto e, portanto, não pode prever a vida útil da estrutura, em ambientes salinos.

Apesar das críticas atribuídas ao método, alguns pesquisadores afirmam que o teste reflete a penetração dos cloretos do concreto (GJØRV e SAKAI, 1995; MONTEIRO citado por KULAKOWSKI, 1994), sendo largamente utilizado. Deve-se salientar que as vantagens do ensaio são relativas à fácil e rápida execução, além de poder ser aplicado em quase todos os tipos de concreto (PERRATON et al., 1992). Cabe frisar ainda que Algumas modificações na estrutura original do ensaio foram propostas, como a redução da tensão aplicada e do tempo de duração do ensaio e o monitoramento do cloreto na célula de  $\text{NaOH}$  (TANG e NILSSON, 1992; DETWILLER et al., 1991; GJØRV e SAKAI, 1995). Uma das adaptações é o método abaixo.



### 2.5.5.2 Ensaio de Migração de cloretos

Como já explicado, um dos principais mecanismos de penetração de cloretos em estruturas de concreto armado é a difusão iônica. Entretanto, a determinação do coeficiente de difusão através de ensaios sob condições normais demanda um tempo prolongado, que pode durar meses ou até anos. Por isso, foram desenvolvidos novos ensaios utilizando-se campos elétricos com o intuito de acelerar a difusão de cloretos. Sobre o mecanismo de transporte por difusão em si, foi feita uma abordagem no item 2.3.3. Aqui serão discutidos apenas alguns aspectos relativos do ensaio de difusão de cloretos utilizado na pesquisa.

Este método consiste em posicionar uma fina fatia de corpo-de-prova entre duas células, uma contendo uma solução com íons cloreto (célula 1) e a outra contendo uma solução livre destes íons (célula 2). Cada célula contém um eletrodo de forma que se pode gerar uma diferença de potencial entre as duas células, originando uma corrente que induz o transporte de íon cloreto através do corpo-de-prova, colocado entre as duas células. Ao longo do tempo é feito o monitoramento da concentração de cloreto na célula que não continha os mesmos inicialmente. A partir de um determinado momento, observa-se que a taxa de ingresso de cloretos na célula 2 torna-se constante, indicando que o fluxo atingiu a condição estacionária. Com a determinação da evolução da concentração de cloretos na célula 2, obtém-se o gráfico concentração de íons cloretos *versus* o tempo, de onde calcula-se o fluxo de íons (J), no estado estacionário. A partir deste momento utiliza-se a equação de Nerst-Plank (descrita no item 3.5.1) para o cálculo do coeficiente efetivo de difusão.

Segundo ANDRADE (1993), tensões entre 10 e 15V são altas o suficiente para promover uma rápida migração de íons, e pequenas o suficiente para evitar o superaquecimento das soluções. Também é aceito que não há convecção dentro do concreto e que a concentração de cloretos em uma célula deverá ser muito maior do que na outra. Considera-se ainda, para este método de ensaio, que o processo de difusão é desprezível comparado à migração quando campos de tensões maiores que 10V são aplicados. Uma outra recomendação sugerida é que os discos de concreto sejam finos o suficiente para permitir um estado de fluxo constante em pouco tempo, garantindo, em parte, que todo o  $C_3A$  do corpo-de-prova seja saturado em poucas horas e que um fluxo linear de cloretos seja estabelecido ao longo do tempo. Espessuras de discos das mais variadas foram usados por alguns pesquisadores, dos quais pode-se citar: LOPES (1999) e HOFFMANN (2001) com discos de concreto de 25 mm de espessura; CABRAL (2000) e ANDRADE et al. (1994) com discos de argamassa de 10 mm; BAUER (1995) com discos de pasta de cimento com 5 mm de espessura e PAGE et al. (1981) também com discos de pasta de cimento, só que com 3 mm de espessura.

Um ponto levantado por BUENFELD e EL-BELBOL (1991) é a questão da dimensão máxima característica do agregado graúdo e da espessura do corpo-de-prova, pois pode ser que alguns agregados mais alongados estejam de uma face a outra do corpo-de-prova, o que é indesejável, já que há evidências de que a interface pasta/agregado promove um caminho relativamente fácil de fluxo.

Segundo ZHANG e GJØRV, citados por CALÇADA (2000), o ensaio de migração é uma boa opção para a determinação do coeficiente efetivo de difusão, entretanto não é considerado o período em que os íons cloretos estão se combinando com os hidratos do cimento, fase esta de extrema importância na modelagem do ingresso deste agente agressivo. Para MACKECHNIE e ALEXANDER (2000) a difusão de cloretos através do concreto é um processo relativamente lento, que envolve interações complexas entre o material e o meio ambiente, e, portanto, os testes rápidos de penetração de cloretos não servem para quantificar todas estas influências.

PETTERSSON, citado por DETWILER (2000), quanto a interpretação dos dados, salienta que as leis de Fick consideram que o material apresenta poros uniformes, retilíneos e contínuos, o que certamente não se aplica para o concreto. Além disso, DHIR et al. (1999), acrescentam que estas leis pressupõem que a difusão no material, para qualquer ponto, será a mesma em todas as direções. Portanto, no concreto a difusão de íons cloreto é um mecanismo muito mais complexo do que descrito pelas leis de Fick.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos neste trabalho foi desenvolvido um projeto experimental que possibilitasse a análise das medidas dos coeficientes de difusão de cloretos em diversos tipos de concretos, submetidos a variados tempos e temperaturas de cura, relações água/cimento e utilizando dois distintos tipos de cimentos. Também estavam previstos ensaios de resistência à compressão axial, bem como a determinação da penetração acelerada de cloretos nos concretos. O projeto experimental foi embasado estatisticamente para permitir uma maior confiabilidade nos resultados do final dos experimentos.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

##### 3.1.1 Variáveis analisadas

De acordo com o objetivo deste trabalho, que é medir coeficientes de difusão de cloretos em concretos confeccionado com diferentes tipos de cimentos, relações água/cimento, tempo e temperatura de cura, foram definidas as variáveis de resposta abaixo relacionadas:

- Migração de íons cloretos. Decidiu-se seguir o método proposto por ANDRADE (1993), por este já ser bastante utilizado no meio técnico. Além de fornecer valores dos coeficientes de difusão, seus dados podem ainda ser utilizados em modelos matemáticos para previsão de vida útil das estruturas.
- Penetração de íons cloretos. Optou-se por este ensaio por o mesmo ser muito empregado no meio técnico e, ao mesmo tempo, muito criticado. Por isso, decidiu-se fazer uma análise comparativa entre ele e o de migração de cloretos.
- Resistência à compressão axial. Tradicionalmente a resistência à compressão tem sido empregada como critério para avaliar o desempenho dos concretos. Portanto, decidiu-se medir esta propriedade neste trabalho como um parâmetro de controle dos concretos produzidos.

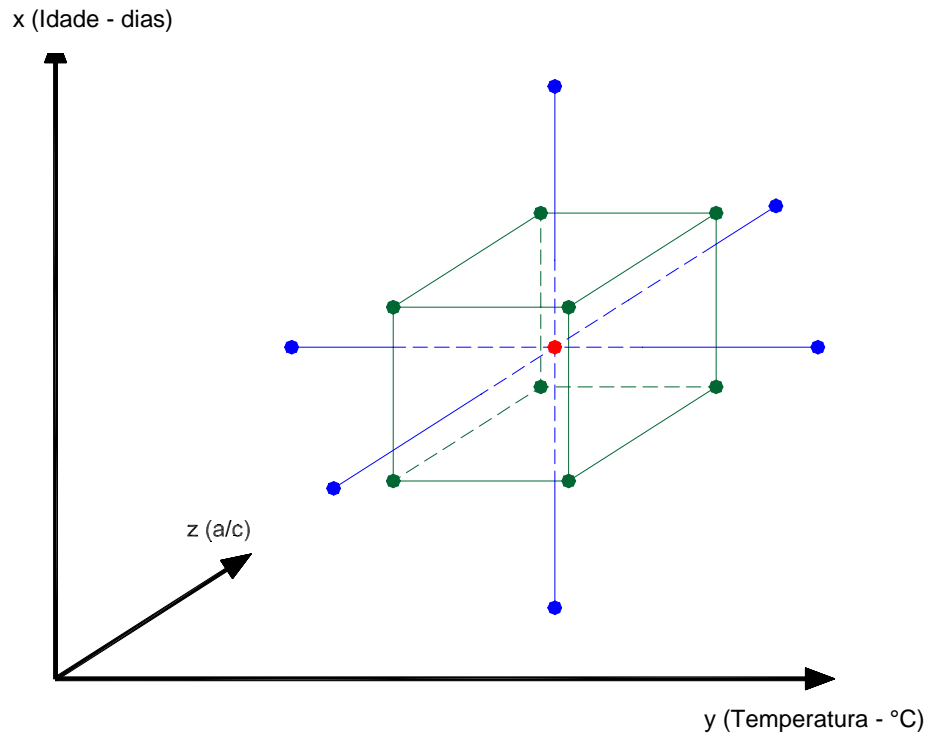
A partir das variáveis de resposta que se desejava mensurar, foram determinados os parâmetros de processo, isto é, as variáveis que podem ser alteradas e que talvez exerçam alguma influência sobre as variáveis de resposta. Como, para concretos, a penetração de cloretos depende do coeficiente de difusão e, em condições normais, este coeficiente é governado principalmente pela relação água/cimento, pelo tipo de cimento, pela presença de adições minerais, pela temperatura e pelo tempo de exposição, cinco níveis de cada variável foram escolhidas e combinadas entre si.

Entretanto, deve-se ressaltar que o projeto estatístico foi repetido duas vezes, ou seja, para cada tipo de cimento foram feitos todos os pontos do projeto, já que se esperava que os dois tipos de cimento utilizados apresentassem comportamento diferenciado.

- Relação água/cimento (a/c): 0,28; 0,35; 0,45; 0,60 e 0,75. A variação deste parâmetro teve por objetivo avaliar o comportamento dos coeficientes de difusão de cloretos em concretos com diferentes condições microestruturais.
- Temperatura de cura: 5; 15; 25; 30 e 40°C. Foram utilizadas estas temperaturas por serem valores encontrados, durante o ano, na região de Porto Alegre.
- Idade: 7; 14; 28; 63 e 91 dias. Empregou-se esses valores por serem os tempos tradicionalmente utilizados no meio técnico.
- Tipos de cimento: CP II F-32 e CP IV-32. Foi escolhido o cimento CP II F-32 por ser muito empregado no Nordeste, uma região que apresenta um grande número de estruturas de concreto armado com problemas de corrosão de armaduras. E a escolha do cimento CP IV-32 deve-se ao fato dele corresponder à quase totalidade do cimento consumido na região de Porto Alegre.

### 3.1.2 Projeto estatístico

Optou-se por um projeto estatístico pela otimização que este fornece, reduzindo tempo de execução e custo do programa experimental. A utilização de um projeto fracionado possibilita a execução de experimentos de forma mais prática, pois se o programa experimental executado tivesse sido o completo, seria necessário a moldagem de 2250 corpos-de-prova, já com o uso do projeto estatístico este número caiu para apenas 176 corpos-de-prova. Além disso, aumenta a precisão da aquisição dos dados e facilita a análise dos resultados obtidos. O tipo de projeto estatístico utilizado foi o de composição central, que consiste em um projeto fatorial fracionado, constituído por pontos axiais e pontos centrais no espaço, por ser constituído de 3 variáveis ou fatores trabalhados (RIBEIRO, 1999). A Figura 8 apresenta o esquema do projeto definido.



**Figura 8** Projeto de composição central para 3 fatores ou variáveis

A Tabela 3 apresenta as coordenadas dos pontos axiais e centrais do projeto fracionado. Os pontos escolhidos obedecem uma distribuição que permitirá a construção de modelos de comportamento. Os pontos axiais e centrais, que formam a estrela, possibilitam a identificação de interações entre os fatores. Já os pontos que formam o cubo captam a curvatura ou os efeitos de mais alta ordem.

**Tabela 3** Parâmetros de Processo

Nº Experimento	Tipo de Cimento	a/c	Idade (dias)	Temperatura (°C)	
1	CP II – F	0,35	14	15	CUBO
2		0,35	14	30	
3		0,35	63	15	
4		0,35	63	30	
5		0,60	14	15	
6		0,60	14	30	
7		0,60	63	15	
8		0,60	63	30	
9		0,45	91	25	ESTRELA
10		0,45	28	5	
11		0,45	28	40	
12		0,45	7	25	
13		0,75	28	25	
14		0,28	28	25	
15		0,45	28	25	
16	CP IV	0,35	14	15	CUBO
17		0,35	14	30	
18		0,35	63	15	
19		0,35	63	30	
20		0,60	14	15	
21		0,60	14	30	
22		0,60	63	15	
23		0,60	63	30	
24		0,45	91	25	ESTRELA
25		0,45	28	5	
26		0,45	28	40	
27		0,45	7	25	
28		0,75	28	25	
29		0,28	28	25	
30		0,45	28	25	

Cada ponto do projeto estatístico está relacionado a uma betonada, que por sua vez representa uma mistura de concreto correspondente a uma determinada combinação de fatores controláveis.

Para diminuir os chamados fatores de ruído ou fatores que não podem ser controlados, foi definido, ainda pelo projeto estatístico, que deveriam ser executadas duas repetições do ponto central e da estrela e que, ainda, todos os pontos fossem aleatorizados durante a execução dos traços de concreto.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir serão apresentadas as características dos materiais utilizados na produção dos concretos e empregados nos ensaios.

#### 3.2.1 Tipos de cimentos

As características físicas, químicas e mecânicas dos cimentos, CP II F-32 e CP IV-32, utilizados encontram-se na Tabela 4 e na Tabela 5, respectivamente. Os cimentos foram fornecidos em sacos de 50 kg, provenientes do mesmo lote.

**Tabela 4** Propriedades químicas, físicas e mecânicas do CP II F-32

Propriedades químicas do CP II F-32		
Composição química do cimento		Resultados (%)
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )		18,60
Óxido de cálcio total (CaO)		63,97
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		4,52
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		2,52
Óxido de magnésio (MgO)		2,29
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )		2,01
Óxido de cálcio livre (CaO livre)		1,13
Silicato dicálcico (C <sub>2</sub> S)		2,47
Silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S)		69,39
Aluminato tricálcico (C <sub>3</sub> A)		6,78
Ferroaluminato tetracálcico (C <sub>4</sub> AF)		7,67
Perda ao fogo		5,12
Resíduos insolúveis		0,80
Adição – calcário		10,00
Propriedades físicas e mecânicas do CP II F-32		
Expansibilidade a quente (mm)		0,0
Tempo de pega (min)	Início	232
	Fim	338
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		3714
# 325 (%)		16,97
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,100
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	23,90
	7 dias	29,80
	28 dias	38,30

Fonte: Relatório de Ensaio, período Abril/00, fornecido pelo fabricante

**Tabela 5** Propriedades químicas, físicas e mecânicas do CP IV-32

Propriedades químicas do CP IV-32		
Composição química do cimento		Resultados (%)
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )		36,84
Óxido de cálcio total (CaO)		62,27
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		12,91
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		3,37
Óxido de magnésio (MgO)		4,39
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )		2,18
Óxido de cálcio livre (CaO)		2,71
Silicato dicálcico (C <sub>2</sub> S)		8,58
Silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S)		66,63
Aluminato tricálcico (C <sub>3</sub> A)		6,02
Ferroaluminato tetracálcico (C <sub>4</sub> AF)		8,32
Perda ao fogo		2,86
Resíduos insolúveis		38,26
Adição – cinza volante		31,1
Propriedades físicas e mecânicas do CP IV-32		
Expansibilidade a quente (mm)		0,5
Tempo de pega (min)	Início	269
	Fim	-
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		5000
# 325 (%)		1,9
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,720
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	18,40
	7 dias	22,70
	28 dias	33,40

Fonte: Relatório de Ensaio, período Maio/00, fornecido pelo fabricante

### 3.2.2 Agregado graúdo

Como agregado graúdo utilizou-se brita de origem basáltica cujas características encontram-se na Tabela 6. Este agregado foi lavado para retirada de qualquer impureza ou material pulverulento que o mesmo pudesse conter e colocado para secar ao ar.



**Tabela 6** Características do agregado graúdo

Composição granulométrica do agregado graúdo			
Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulado	Método de ensaio (NBR)
19	2,0	2	7217/1987
12,5	52,9	55	
9,5	27,9	83	
6,3	14,5	97	
4,8	2,1	99	
< 4,8	0,6	100	
Total	100	-	
Módulo de finura	6,84		7217/1987
Dimensão máxima característica (mm)	19		7217/1987
Gradação – 7211/83	Brita 1		-
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,72		9937/1987

### 3.2.3 Agregado miúdo

Utilizou-se areia quartzosa comumente empregada em concretos na região de Porto Alegre, proveniente do Rio Jacuí. Todo o material foi previamente seco ao ar. As características do mesmo encontram-se na Tabela 7.

**Tabela 7** Características do agregado miúdo

Composição granulométrica do agregado miúdo			
Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulado	Método de ensaio (NBR)
4,8	0,1	0	7217/1987
2,4	8,1	8	
1,2	14,9	23	
0,6	34,3	57	
0,3	29,4	87	
0,15	12,1	99	
< 0,15	1,1	100	
Total	100	-	
Módulo de finura	2,77		7217/1987
Dimensão máxima característica (mm)	4,8		7217/1987
Gradação (zona) – 7211/83	Zona 3, areia média		-
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,621		9776/1987

### 3.2.4 Aditivo químico

O aditivo químico utilizado para a moldagem dos corpos-de-prova ensaiados nessa pesquisa foi um superplastificante à base de naftaleno sulfonado. O aditivo foi agitado manualmente, antes de ser empregado, para proporcionar a sua homogeneização.

### 3.2.5 Água

Foi utilizada para execução do concreto água proveniente da rede pública de abastecimento local.

## 3.3 DOSAGEM EXPERIMENTAL

Para dosagem do concreto foi adotado o método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), que consiste no ajuste do teor ótimo de argamassa para um traço intermediário, para um valor de abatimento pré-fixado. Em seguida são executados mais dois traços, um mais pobre e outro mais rico em cimento. Para cada traço são moldados 4 corpos-de-prova, que são ensaiados à resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias, respectivamente. Com os resultados é elaborado o diagrama de dosagem que correlaciona resistência à compressão, relação água/cimento, traço e consumo.

### 3.3.1 Ajuste do teor ideal de argamassa

Para determinação do teor ideal de argamassa foi utilizado o traço 1:5,5 em massa de cimento para materiais secos. Esta escolha foi baseada no intervalo da relação água/cimento que variou de 0,28 a 0,75. A trabalhabilidade foi estabelecida através do ensaio de abatimento (NBR 7223/82), fixado em  $70 \pm 10$  mm. O teor de argamassa seca considerado satisfatório, para os materiais utilizados, foi de 50%.

### 3.3.2 Traços auxiliares

Após a determinação do teor ideal de argamassa são calculados os traços auxiliares do estudo da dosagem. Foram calculados mais quatro traços auxiliares, dois mais ricos ( $m = 1,5$  e  $m = 3,5$ ) e dois mais pobres em cimento ( $m = 7,5$  e  $m = 9,5$ ), para que todo o intervalo de variação da relação água/cimento fosse contemplado pelo estudo.

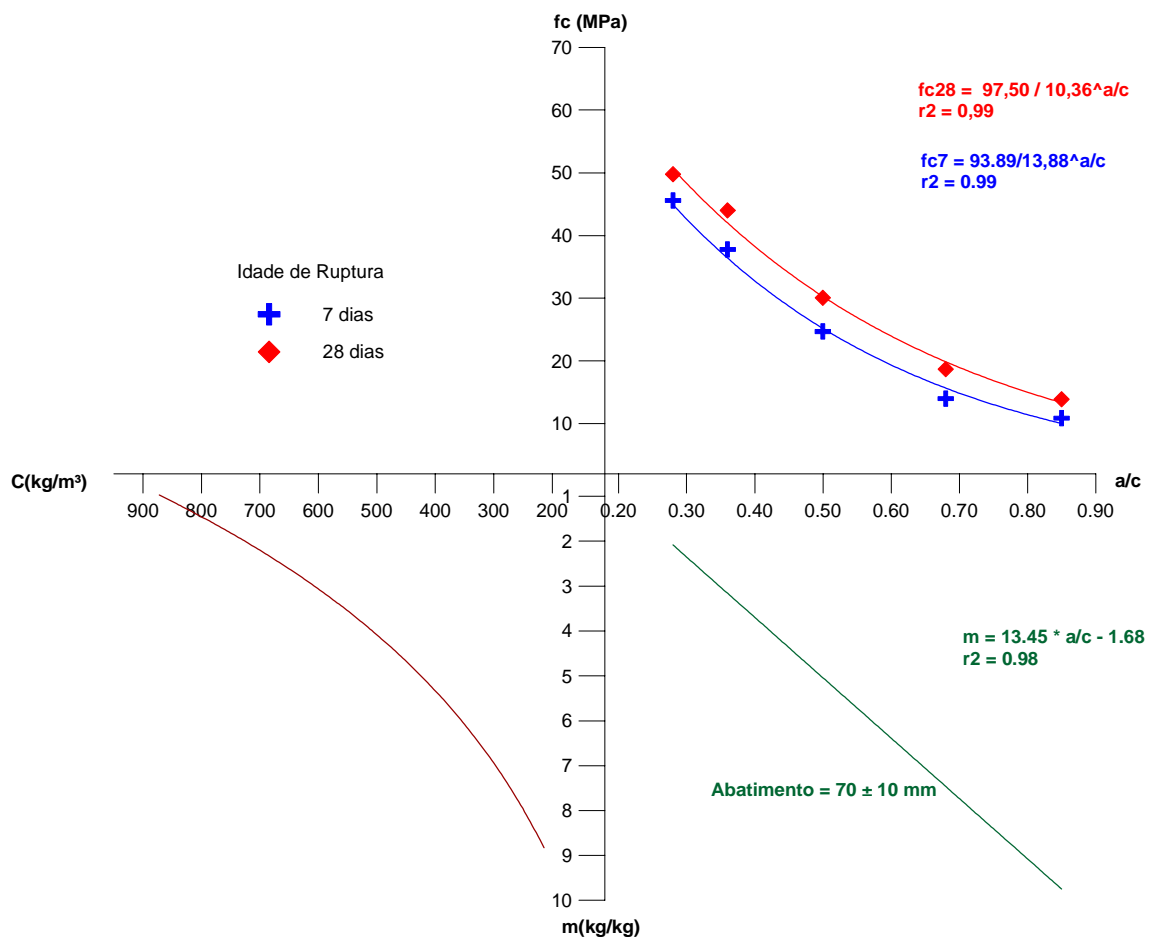
Depois de calculados os traços auxiliares, foram realizadas as misturas experimentais, ajustando, para cada traço, a relação água/cimento de forma a obter a medida de abatimento fixada para o experimento.

Para as relações água/cimento 0,28 e 0,35, fez-se necessária a utilização de aditivo superplastificante para atender às especificações de abatimento dos concretos e reduzir o consumo de cimento.

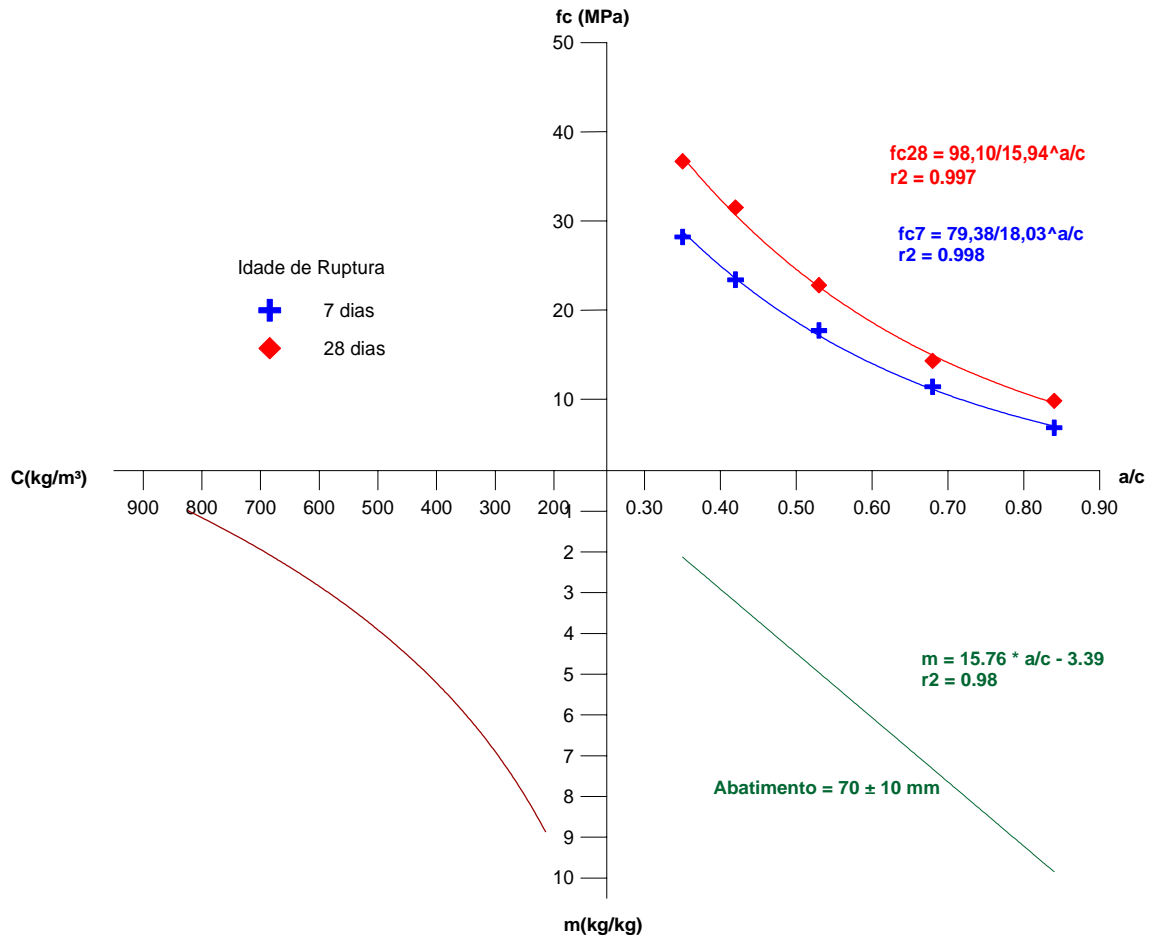
### 3.3.3 Obtenção dos traços de concreto a serem estudados

Como foi descrito no Item 3.3.1, primeiro determinou-se o teor ideal de argamassa em 50% e com este foram calculados os traços auxiliares. De posse dos traços foram efetuadas as misturas experimentais para, então, traçar o diagrama de dosagem.

Vale ressaltar que, para cada tipo de cimento, foi realizada uma dosagem experimental. Na Figura 9 e Figura 10 pode-se visualizar os diagramas de dosagem para o CP II F e CP IV, respectivamente.

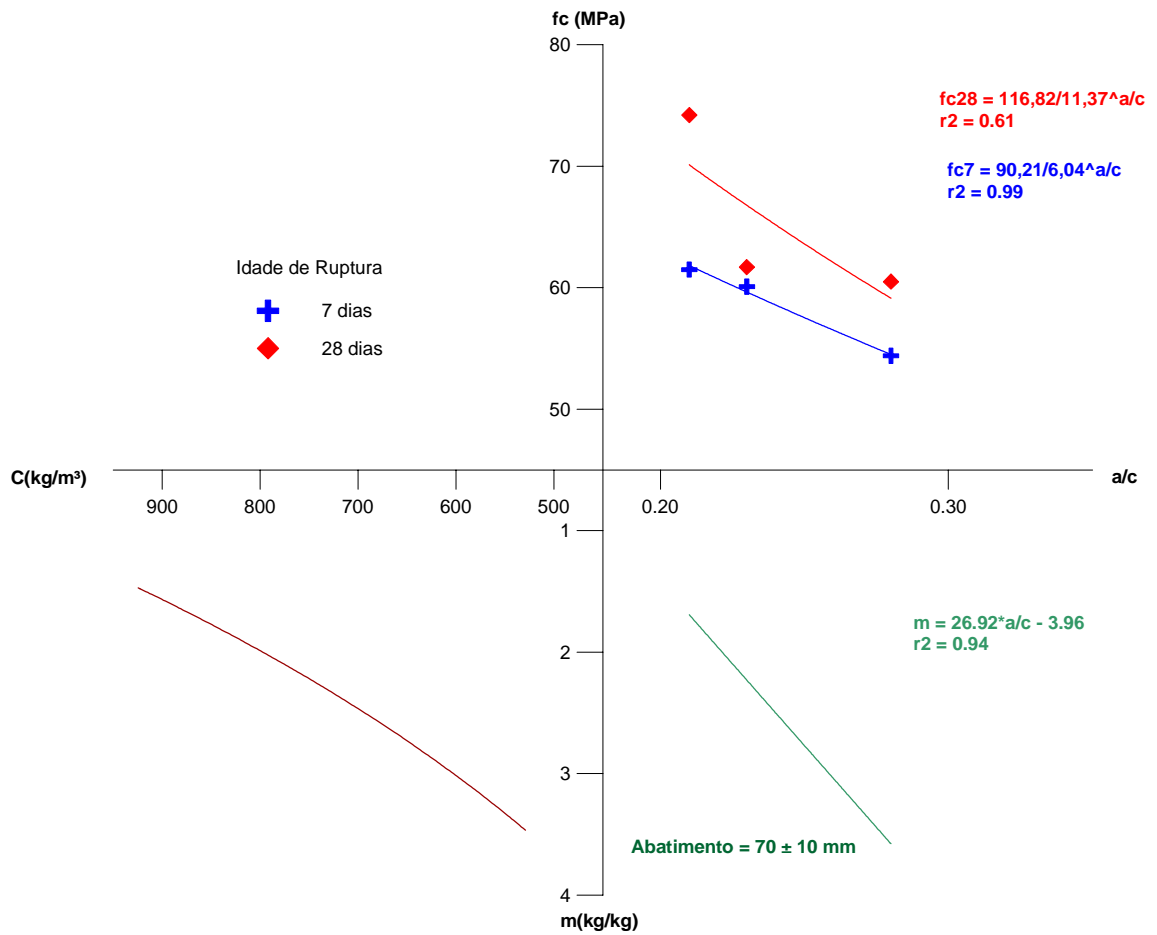


**Figura 9** Diagrama de dosagem para os concretos confeccionados com CP II F

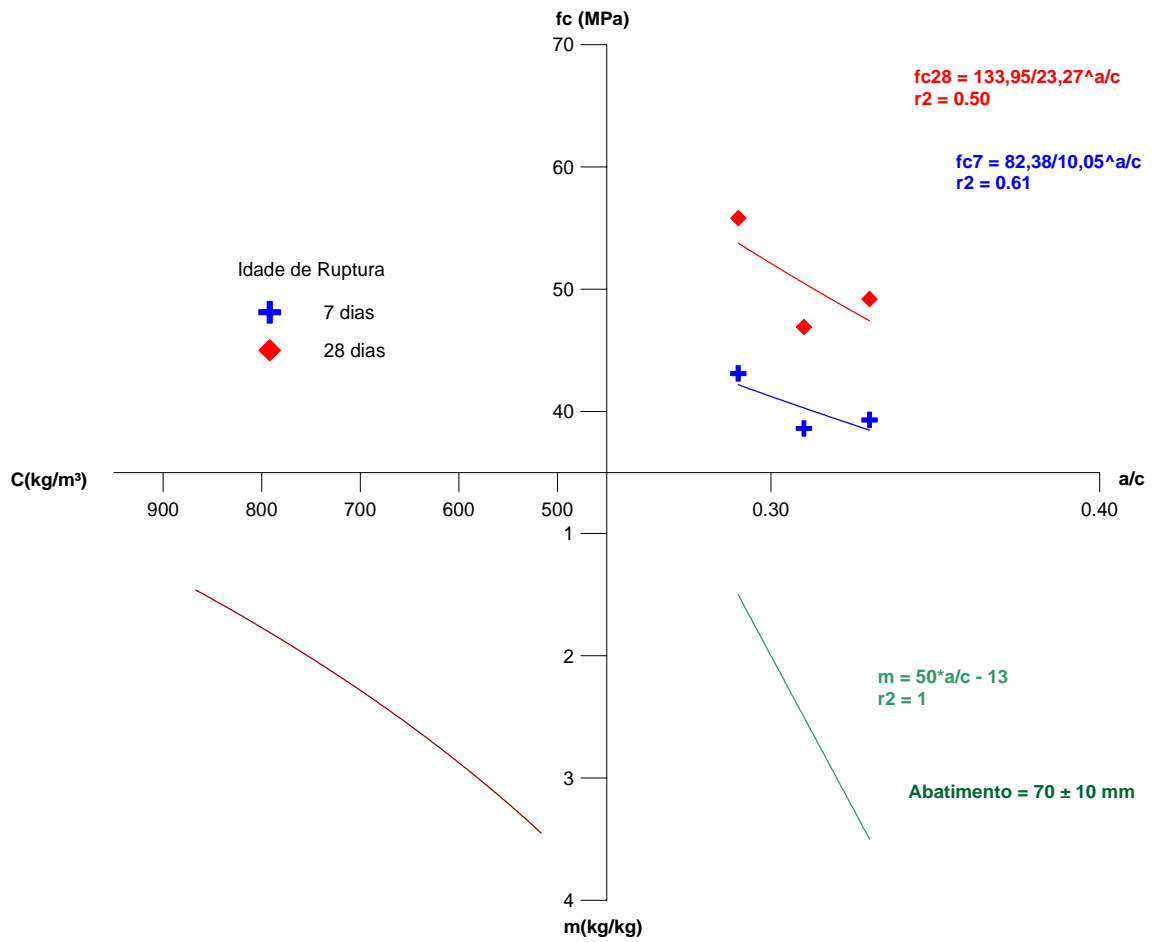


**Figura 10** Diagrama de dosagem para os concretos confeccionados com CP IV

Como foi dito anteriormente, nos traços com relações água/cimento de 0,28 e 0,35, para os dois tipos de cimento, verificou-se um elevado consumo de cimento e um abatimento abaixo da faixa especificada. Portanto fez-se necessário a realização de uma dosagem experimental com utilização de 1,5% de aditivo superplastificante. Daí o estabelecimento de diagramas de dosagem específicos para esta faixa de relação água/cimento, para cada tipo de cimento, conforme apresentado na Figura 11 e na Figura 12.



**Figura 11** Diagrama de dosagem para os concretos que possuem relação água/cimento entre 0,28 e 0,35 com CP II F



**Figura 12** Diagrama de dosagem para os concretos que possuem relação água/cimento entre 0,28 e 0,35 com CP IV

Com os diagramas de dosagem foram estabelecidos os traços unitários para cada relação água/cimento e também calculados os consumos de cimento para cada traço. Assim, os traços e seus respectivos consumos estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8** Traços em massa para a produção dos concretos e consumo de cimento/m<sup>3</sup>

Traço n.º	Tipo de cimento	a/c	Teor de Argamassa (%)	m	a	p	Teor de água - h (%)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
1	CP II F	0,28	50	3,58	1,29	2,29	6,12	522
2	CP II F	0,35	50	4,47	1,74	2,74	6,40	434
3	CP II F	0,45	50	4,78	1,89	2,89	7,78	395
4	CP II F	0,60	50	6,39	2,69	3,69	8,12	306
5	CP II F	0,75	50	8,41	3,70	4,70	7,97	240
6	CP IV	0,28	50	2,00	0,50	1,50	9,33	739
7	CP IV	0,35	50	4,50	1,75	2,75	6,36	430
8	CP IV	0,45	50	4,02	1,51	2,51	8,97	445
9	CP IV	0,60	50	6,07	2,53	3,53	8,49	317
10	CP IV	0,75	50	8,43	3,72	4,72	7,95	239

### 3.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO

A concretagem obedeceu aos critérios de aleatorização, discutidos anteriormente. Para a execução dos concretos se fez uso de betoneira de eixo vertical, previamente imprimada com argamassa de cimento e areia.

#### 3.4.1 Mistura dos materiais

Para a produção do concreto, a realização das misturas seguiu a ordem comumente utilizada no laboratório, ou seja, colocou-se primeiramente a brita, um pouco de água, o cimento, a água restante e por fim a areia. Para as misturas que necessitavam da utilização de aditivo superplastificante, este foi colocado antes da colocação da areia, para que a dispersão dos grãos de cimento pudesse ser mais eficaz.

A verificação do abatimento foi realizada de acordo com a NBR 7223/82, após a completa mistura dos materiais na betoneira.

#### 3.4.2 Moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova de concreto foram moldados de acordo com a prescrição da NBR 5738/94 e posteriormente adensados mecanicamente, em uma única camada, com vibrador de agulha. Foram retirados corpos-de-prova, para todos os ensaios, de uma mesma betonada.

Para cada traço de concreto produzido foram moldados 4 corpos-de-prova, em formas cilíndricas metálicas de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, sendo dois utilizados para os ensaios de resistência à compressão, um para execução do ensaio de penetração de cloretos e um para a realização do ensaio de migração de cloretos. Após a concretagem, os corpos-de-prova foram cobertos com sacos plásticos, para evitar perda de água da parte superficial, permanecendo nas formas por 24 horas. Depois de desmoldados, os corpos-de-prova foram embalados em sacos plásticos (Figura 13), por um período de 14 dias, e curados em temperaturas diferentes, de acordo com o projeto de experimentos, permanecendo nestes locais até a data da realização dos ensaios. De acordo com RAHHAL et al. (1998), é recomendada uma cura mínima de 7 dias para a maioria das estruturas de concreto, quando se utiliza cimento Portland comum. Entretanto, quando se emprega um cimento com adições pozolânicas, o tempo mínimo de cura deve ser prolongado para 14 dias, devido à reação pozolânica levar um tempo maior e requerer água para ocorrer.



**Figura 13** Aspecto do corpo-de-prova embalado em saco plástico para cura

Os ambientes a que ficaram expostos os corpos-de-prova estão descritos na Tabela 9.

**Tabela 9** Descrição dos ambientes em que os corpos-de-prova ficaram expostos

Local dos Ambientes	Temperatura (°C)	Umidade (%)
Câmara fria	$5 \pm 2$	$50 \pm 5$
Sala com ar condicionado	$15 \pm 3$	$60 \pm 10$
Câmara climatizada	$25 \pm 2$	$70 \pm 5$
Estufa 1	$30 \pm 2$	$45 \pm 5$
Estufa 2	$40 \pm 2$	$40 \pm 5$

### 3.5 PROPRIEDADES AVALIADAS

Na seqüência serão apresentados os métodos de ensaio utilizados para cada variável de resposta estudada.

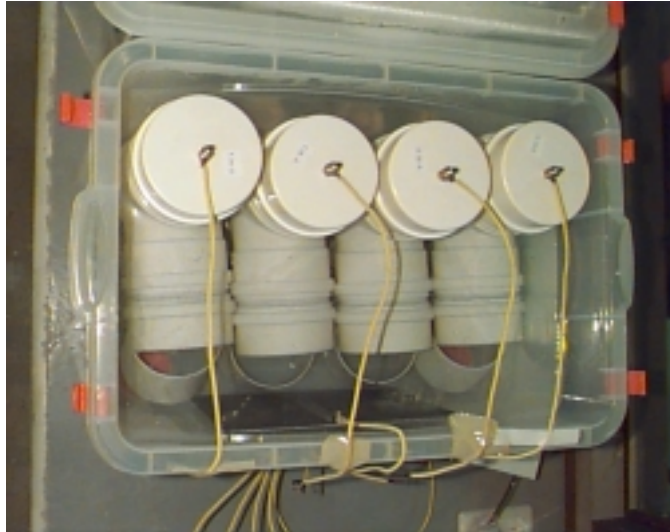
#### 3.5.1 Migração de íons cloretos

Para o ensaio de migração de cloreto, proposto por ANDRADE (1993), adotou-se o procedimento, descrito a seguir, através do qual pode-se encontrar o valor do coeficiente de difusão de cloretos e a concentração destes íons no decorrer do tempo, dados utilizados em modelos matemáticos de previsão de vida útil. É importante salientar que este método ainda não foi normatizado.

Como já descrito no item 2.5.5.2, o ensaio de migração de cloreto consiste em submeter um disco de concreto, de 95 mm de diâmetro e 25 mm de espessura, entre duas câmaras, com uma delas contendo água deionizada (na câmara positiva) e a outra uma solução de cloreto de sódio (NaCl), com concentração de 0,5M (na câmara negativa). Em cada câmara positiva e negativa há um eletrodo,



representado por uma barra de aço inox de 6,25 mm e por uma placa de aço inox, respectivamente, de forma que se pode gerar uma diferença de potencial entre as câmaras, originando uma corrente que induz o transporte de íons cloreto através do corpo-de-prova, colocado entre as duas câmaras (Figura 14). Para se imprimir a diferença de potencial utilizou-se uma fonte de corrente contínua de 12V.



**Figura 14** Realização do ensaio de migração de cloretos

Dois dias antes do ensaio, os discos de concreto utilizados, de 95 x 25 mm, foram retirados da parte central, através de um corte perpendicular ao eixo, dos corpos-de-prova cilíndricos de concreto com dimensões de 95 x 190 mm. Estes foram então revestidos com resina epóxi nas laterais (Figura 15).



**Figura 15** Revestimento do corpo-de-prova de concreto com resina epóxi

Para execução dos ensaios foi empregado um aparato, desenvolvido por BAUER (1995) e utilizado por alguns pesquisadores (GUIMARÃES, 1997; CABRAL, 2000; HOFFMANN, 2001), onde a câmara positiva era formada por conexões de PVC, constituídas de cap, tubo e tê de 100 mm de diâmetro, conforme apresentado na Figura 16.



**Figura 16** Célula positiva utilizada no ensaio

Um dia antes do ensaio, as conexões foram vedadas com adesivo à base de poliuretano para evitar a saída ou ingresso de solução, fazendo com que a área exposta do corpo-de-prova entre as duas câmaras se tornasse o único ponto possível da passagem dos íons (Figura 17).



**Figura 17** Vedação da célula positiva com poliuretano

Para determinar os valores das correntes elétricas, e com isto ter-se um indicativo do aumento da quantidade de íons cloreto na solução anódica, foram colocadas resistências ôhmicas de  $1\Omega$  nos fios que interligavam a fonte às câmaras positivas, já que o aumento da corrente elétrica indica um aumento da concentração de íons. O valor da corrente foi encontrado pela equação 3.1. Este valor sempre era igual, neste ponto, ao valor da voltagem medida, através de um amperímetro, durante a realização de todo o ensaio, pois o valor da resistência era igual a  $1\Omega$ .

$$V = R \times I \quad (3.1)$$

Onde:

V – voltagem, em volt

R – resistência, ( $1 \Omega$ )

I – Corrente (em mA)

A periodicidade da coleta da amostra, em torno de 3ml de solução, de cada câmara positiva, variou de acordo com as características de cada corpo-de-prova (relação água/cimento, idade, temperatura e tipo de cimento). Deve-se salientar que as soluções presentes, tanto na câmara positiva como na câmara negativa, não eram compensadas, já que o volume de solução retirado pode ser considerado insignificante, em relação ao volume total.

O volume coletado era posto em um béquer de 100ml, o qual continha 47 ml de água deionizada. Em seguida, com o auxílio de uma pipeta de 5 ml, adicionava-se no béquer 1 ml da solução ajustadora de força iônica (ISA) e, esta solução final, era homogeneizada em um agitador magnético, no qual determinava-se a evolução da concentração de íons cloreto na mesma, através de um eletrodo de íon seletivo (Figura 18).



**Figura 18** Medição da concentração de cloretos através do eletrodo de íon seletivo

Com esses valores da concentração de cloretos na célula positiva determina-se, através do gráfico concentração de íons cloretos *versus* tempo, o fluxo de íons (J), no estado estacionário, que migra, pelo disco de concreto, da célula negativa para a célula positiva.

De acordo com ANDRADE (1993), é possível com estes dados fazer a determinação do coeficiente de difusão (D) pela utilização do valor do fluxo de íons (J) na equação de transporte de massa de Nerst-Plank (equação 3.2), que serve para calcular movimentos iônicos.

$$D = \frac{J \cdot R \cdot T \cdot l}{z \cdot F \cdot C_{Cl} \cdot \Delta E} \quad (3.2)$$

Onde:

$D$  – coeficiente efetivo de difusão ( $\text{cm}^2/\text{s}$ );

$J$  – fluxo de íons ( $\text{mol}/\text{s}/\text{cm}^2$ );

$R$  – constante do gás ( $1,9872 \text{ cal}/\text{mol}/\text{Kelvin}$ );

$T$  – temperatura (Kelvin);

$l$  – espessura do corpo-de-prova (cm);

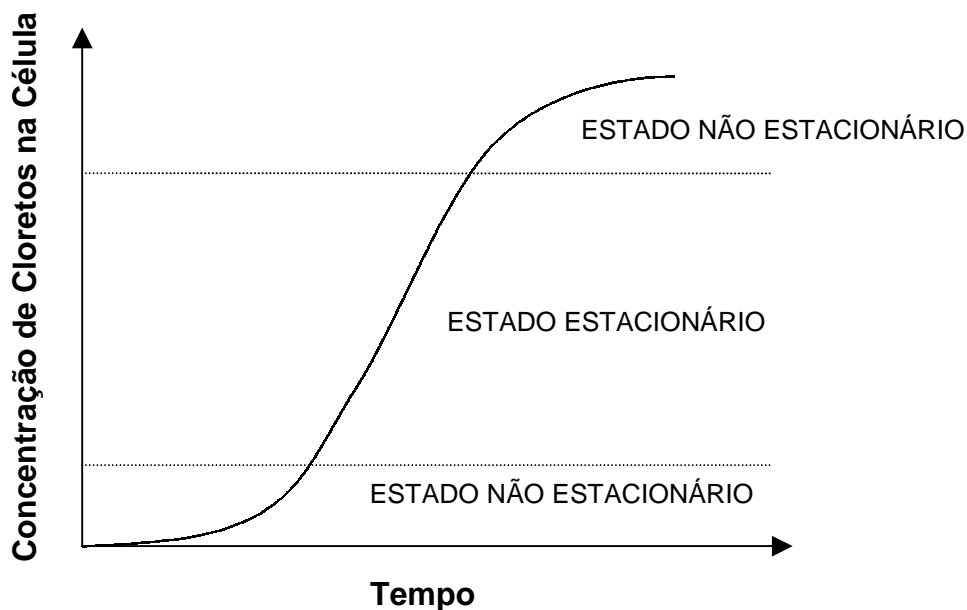
$z$  – carga elétrica (para cloretos igual a 1);

$F$  – constante de Faraday ( $23063 \text{ cal}/\text{volt}/\text{eq}$ );

$C_{Cl}$  – concentração dos íons cloretos na célula negativa ( $\text{mol}/\text{cm}^2$ );

$\Delta E$  – diferença de potencial aplicada (volt).

A Figura 19 ilustra a evolução da concentração de cloretos no tempo, exibindo a região de estado estacionário, de onde é extraído o fluxo de íons ( $J$ ), que é dada pela inclinação da reta obtida pelo gráfico (tangente).



**Figura 19** Forma da curva de evolução da concentração de cloretos na célula positiva (DHIR et al., 1990)

Cabe frisar que o estado estacionário, apresentado no gráfico, corresponde ao período em que o fluxo de íons, passante no corpo-de-prova, está constante. Já para o período considerado de estado não estacionário, o fluxo de íons é variável no tempo.

### 3.5.2 Penetração acelerada de íons cloretos

Neste caso, utilizou-se o ensaio especificado pela ASTM 1202/92, que consiste em acoplar um corpo-de-prova cilíndrico, de 95 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, entre duas meia-células de

acrílico, uma delas contendo uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 0,3N, e a outra com solução de cloreto de sódio (NaCl), com 3% de concentração (em massa). Entre as meias células é gerada uma diferença de potencial de  $60 \pm 0,1$  V, dando origem a uma corrente elétrica que induz o ânion cloreto a se difundir através do concreto sob a ação de um campo elétrico. O ensaio tem duração de seis horas e a corrente elétrica passante é registrada em intervalos de trinta minutos, por meio de um amperímetro. O produto da corrente pelo tempo, expresso em coulombs, indica a carga total que atravessa o corpo-de-prova e revela a maior ou menor resistência do concreto à penetração do íon cloreto.

Nesta pesquisa, quatro células foram ensaiadas simultaneamente por dia, sendo dispostas em paralelo de maneira que fossem submetidas à mesma tensão de  $60 \pm 0,1$ V.

As amostras de concreto utilizadas no ensaio foram retiradas da parte central de corpos-de-prova cilíndricos de dimensões de 95 mm de diâmetro e 190 mm de comprimento.

Os procedimentos dos ensaios obedeceram à seguinte seqüência:

- cinco dias antes da data da realização do ensaio, o corpo-de-prova cilíndrico foi retirado do ambiente de cura no qual se encontrava e serrado em três partes perpendiculares ao eixo. Retirou-se a amostra central de  $(51 \pm 3$  mm) do corpo-de-prova que, em seguida, foi colocado de volta no ambiente em que se encontrava;
- quatro dias antes da data da realização do ensaio, a amostra foi retirada do ambiente climatizado, no qual se encontrava, para ter sua superfície lateral impermeabilizada com resina epóxi (Figura 20);



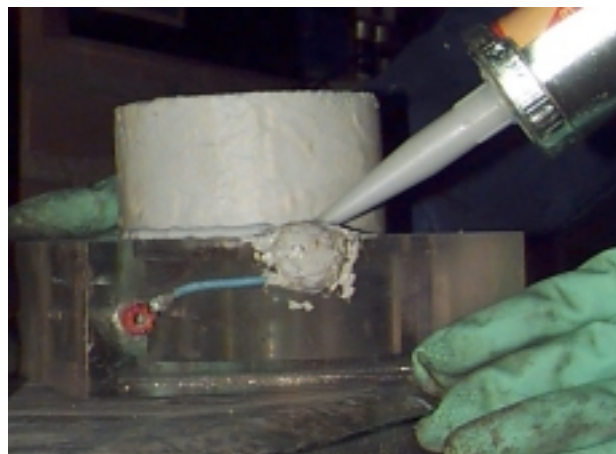
**Figura 20** Impermeabilização das faces laterais do corpo-de-prova com resina epóxi

- três dias antes do ensaio, a amostra foi submetida ao vácuo por quatro horas, sendo que, após decorridos três horas de vácuo a mesma foi submersa em água deaerada e deionizada, permanecendo nessa condição por  $18 \pm 2$  horas (Figura 21);



**Figura 21** Corpos-de-prova submersos na água

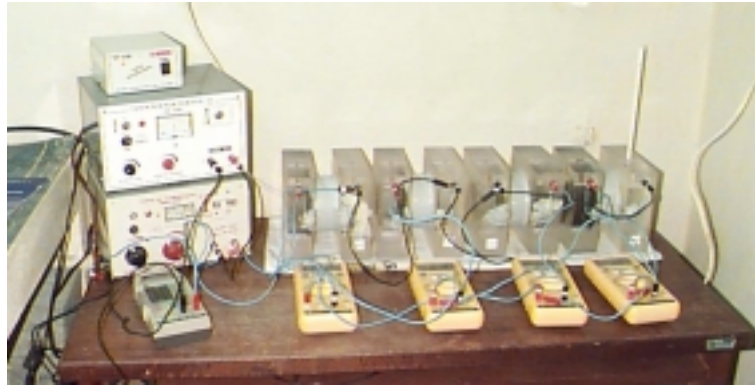
- dois dias antes da realização do ensaio, a amostra foi retirada do dessecador e seca com pano absorvente, para posteriormente ser acoplada às meia-células, fixadas com poliuretano, onde tem-se os eletrodos constituídos por anéis e tela metálica, com os quais o corpo-de-prova fica em contato, para ser submetida à diferença de potencial (Figura 22);



**Figura 22** Fixando o corpo-de-prova na meia célula com poliuretano

- o ensaio foi realizado em câmara climatizada com temperatura de  $25 \pm 2^\circ$  C e umidade relativa de  $70 \pm 5\%$ .

Na Figura 23 visualiza-se as células montadas com as fontes de energia, os amperímetros para registro da corrente e o voltímetro para controle da voltagem.



**Figura 23** Esquema para realização do ensaio de penetração de cloretos

A carga total passante nos corpos-de-prova é calculada pela equação 3.3.

$$Q = 900 * (I_0 + 2 I_{30} + 2 I_{60} + \dots + 2 I_{300} + 2 I_{330} + I_{360}) \quad (3.3)$$

Onde:

$Q$  = carga total passante, em Coulombs;

$I_0$  = corrente imediatamente após a aplicação da diferença de potencial, em Ampères;

$I_t$  = corrente em  $t$  minutos depois da diferença de potencial ser aplicada, em Ampères.

A ASTM C 1202/92 estabelece uma classificação dos concretos quanto à resistência à penetração de cloretos, de acordo com a intensidade de corrente, em Coulombs, medida durante o ensaio, conforme apresentado na Tabela 10. Deve-se ressaltar que esta classificação é apenas qualitativa e serve como um referencial da penetração de cloretos.

**Tabela 10** Ingresso de íons cloreto baseado na carga passante (ASTM C 1202)

Carga Passante (Coulombs)	Penetração de Íons cloreto
> 4000	Alta
2000 – 4000	Moderada
1000 – 2000	Baixa
100 – 1000	Muito Baixa
< 100	Desprezível

### 3.5.3 Resistência à compressão axial

O ensaio foi realizado em corpos-de-prova, com dimensões de 10 x 20 cm, de acordo com a NBR 5739/94 – “Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de Ensaio”, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 91 dias. Porém, antes do ensaio, os corpos-de-prova foram

capeados com enxofre, para que houvesse uma regularização da superfície. Para cada ponto do projeto estatístico foram ensaiados 2 corpos-de-prova por traço de concreto, sendo utilizado como resultado o que apresentou maior valor.



## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O programa experimental foi embasado por um planejamento estatístico, como foi dito no Capítulo 3, para uma maior confiabilidade da análise dos resultados. Foi utilizada a regressão linear múltipla para a análise estatística dos efeitos e das interações existentes entre os fatores controláveis. A análise de regressão permite uma avaliação do efeito dos fatores controláveis, identificando quais são os significativos, ou seja, quais os fatores controláveis que têm um efeito significativo sobre a variável de resposta. O programa Statgraph foi usado na análise de regressão, o qual fornece equações ajustadas de cada modelo testado, bem como os parâmetros da análise de variância e os valores de  $r^2$  (ou coeficiente de determinação) de cada análise. Cabe ressaltar ainda que, as equações ajustadas obtidas para os modelos de comportamento das propriedades avaliadas, foram testadas e analisadas de várias formas até que se chegasse a equação que melhor ajustasse o modelo de comportamento.

A seguir serão apresentados os resultados e feita a análise dos ensaios realizados nos concretos. Foram construídos modelos matemáticos que explicam a forma como as propriedades do concreto são afetadas pelas variáveis independentes (parâmetros do processo, definidas no Item 3.1.1) e suas interações. Os modelos foram ajustados para níveis codificados de cada um dos parâmetros utilizados. Dentro dos intervalos previstos é possível avaliar qualquer traço, bastando para isso calcular o código do traço desejado através das equações 4.1, 4.2 e 4.3. Os níveis reais e codificados de cada variável podem ser visualizados na Tabela 11.

$$Valor_{Codificado} = \frac{Valor_{Real} - Média}{SemiAmplitude} \quad (4.1)$$

$$Média = \frac{Valor_{Máx} + Valor_{Mín}}{2} \quad (4.2)$$

$$SemiAmplitude = \frac{Valor_{Máx} - Valor_{Mín}}{2} \quad (4.3)$$

**Tabela 11** Níveis codificados de cada uma das variáveis independentes utilizadas

Relação água/cimento	Nível real	0,28	0,35	0,45	0,60	0,75
	Nível codificado	-1	-0,70	-0,28	0,36	1
Idade	Nível real	7	14	28	63	91
	Nível codificado	-1	-0,83	-0,50	0,33	1
Temperatura	Nível real	5	15	23	30	40
	Nível codificado	-1	-0,43	0,14	0,43	1
Cimento	Nível real	CP II F			CP IV	
	Nível codificado	-1			1	

A análise de acordo com o tipo de cimento deve-se ao fato de que, conforme identificado na literatura e observado através da análise dos resultados, a ser apresentada, cada tipo de cimento caracteriza o concreto de forma diferenciada, influenciando em suas características.

#### 4.1 MIGRAÇÃO DE CLORETOS

A equação 4.4 descreve o modelo ajustado para a migração de cloretos dos concretos produzidos. Os modelos matemáticos foram obtidos através da análise de regressão múltipla dos resultados deste ensaio do programa experimental, apresentadas no ANEXO 3. É importante mencionar que as equações foram ajustadas para os níveis codificados de cada variável que estão apresentados na Tabela 11.

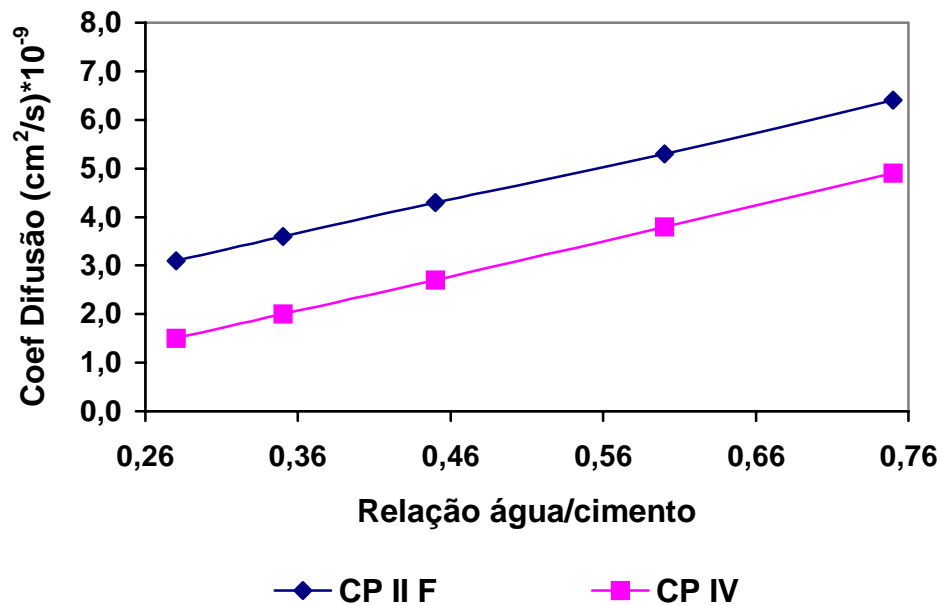
$$C_{Cl} = 3,95998 + 1,68574 * ac - 0,777977 * TCP - 0,9577 * Temp - 0,697335 * Idade \quad (4.4)$$

De acordo com a análise de regressão (ANEXO 4), é possível observar que os efeitos que resultaram significativos para o coeficiente efetivo de difusão de cloretos ( $C_{Cl}$ ), em ordem de importância, são relação água/cimento ( $ac$ ), idade, temperatura de cura ( $Temp$ ) e tipo de cimento ( $TCP$ ). Foi obtido um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,825$  para o modelo, o qual é considerado como um bom ajuste para o ensaio realizado.

A evolução do teor de cloretos com o tempo, nas câmaras positivas, e a leitura da intensidade de corrente ao longo do tempo dos concretos estudados, encontram-se nos gráficos constantes no ANEXO 3. Pode-se perceber, pelos gráficos da corrente, que os picos são mais elevados e são formados mais rapidamente para os concretos que apresentaram maiores concentrações de cloretos e, conseqüentemente, valores mais altos de coeficiente de difusão de cloretos.

#### 4.1.1 Efeitos isolados da relação água/cimento e do tipo de cimento sobre a migração de cloretos no concreto

A relação água/cimento desempenha um papel fundamental nas características do concreto, pois influencia, dentre outras propriedades, o ingresso de agentes agressivos. Na Figura 24 pode ser visualizado o efeito isolado das variáveis relação água/cimento e tipo de cimento sobre o coeficiente efetivo de difusão de cloretos. Os resultados para montagem da curva foram obtidos a partir da equação 4.4, na qual variou-se os valores codificados da relação água/cimento e do tipo de cimento, mantendo-se as demais variáveis nos seus respectivos pontos médios codificados.



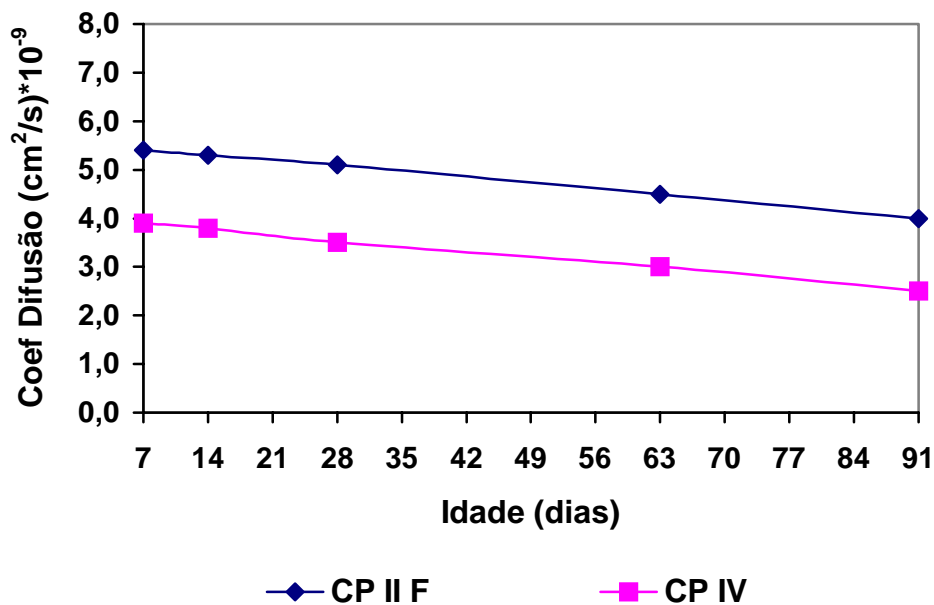
**Figura 24** Efeitos isolados da relação água/cimento e do tipo de cimento sobre o coeficiente efetivo de difusão de cloretos

Observa-se que à medida que a relação água/cimento aumenta, o coeficiente efetivo de difusão de cloretos também aumenta. Pois, provavelmente, quando a relação água/cimento é alta a pasta de cimento terá alta porosidade capilar, contendo um número relativamente elevado de poros grandes e bem conectados, o que ocasionará um aumento no coeficiente de difusão de cloretos. Constata-se, também, que o modelo gerado indica que os concretos confeccionados com CP II F apresentaram coeficientes efetivos de difusão maiores que os concretos produzidos com CP IV, pois a cinza volante presente no cimento CP IV pode fornecer uma estrutura mais densa da pasta de cimento hidratada, impedindo o movimento do íon cloreto devido ao efeito pozolânico que esta adição no cimento produz no concreto. Portanto, o modelo indica que não é apenas a relação água/cimento que determina a migração de cloretos, o tipo de cimento também tem influência sobre esta propriedade.

De acordo com RAUPACH, citado por FIB BULLETINS (1999), e NEVILLE (1997), o coeficiente de difusão de cloretos diminui com a redução da relação água/cimento, devido ao aumento da densidade da pasta pela redução do conteúdo de água. DETWILER et al. (1999) constataram que a diminuição da relação água/cimento, de 0,40 para 0,30, reduz o coeficiente de difusão de cloretos dos concretos estudados cerca de três vezes. FREY et al. (1994) concluíram, também, que a redução da relação água/cimento de 0,40 a 0,70 baixa o coeficiente de difusão de cloretos cerca de 4 vezes, devido à diminuição do volume dos poros dos concretos. PAGE et al. (1981) verificaram que a velocidade de difusão de cloretos aumenta de 4 a 5 vezes com o aumento da relação água/cimento de 0,4 a 0,6. Portanto, os resultados encontrados nesta pesquisa estão de acordo com os encontrados na literatura.

#### 4.1.2 Efeitos isolados da idade e do tipo de cimento sobre a migração de cloretos do concreto

A partir da equação 4.4 calculou-se os valores dos coeficientes efetivos de difusão de cloretos sob os efeitos isolados da idade e do tipo de cimento para cada valor codificado destas variáveis, sendo as demais variáveis mantidas nos seus respectivos pontos médios codificados. De posse destes resultados, obteve-se a reta de tendência de comportamento da migração de cloretos do concreto, que está apresentada na Figura 25.



**Figura 25** Efeitos isolados da idade e do tipo de cimento sobre o coeficiente efetivo de difusão de cloretos

A partir da análise do gráfico observa-se que, quanto maior é a idade, menor é o coeficiente efetivo de difusão de cloretos, para os dois tipos de cimento. Esta redução, quando a idade aumentou

de 7 para 91 dias, foi de 26% para os concretos produzidos com o cimento CP II F e de 36% para os concretos confeccionados com o cimento CP IV. Provavelmente, isto ocorre devido ao prosseguimento da hidratação com o decorrer do tempo, pois o espaço vazio entre as partículas de cimento, originalmente distintas, começa a ser preenchido gradativamente pelos produtos de hidratação. Para os concretos contendo cimento CP IV os valores dos coeficientes efetivos de difusão são menores que para os concretos confeccionados com o cimento CP II F. Provavelmente, isto ocorreu devido ao efeito pozolânico da cinza volante presente no cimento CP IV, ocasionando um refinamento dos poros, substituindo um constituinte mais fraco (hidróxido de cálcio) por um constituinte mais forte (silicato de cálcio hidratado). Além disso, constata-se na composição química do cimento CP IV, que este apresenta um teor mais elevado de aluminatos que o cimento CP II F. Isto irá reduzir o número de cloretos livres, pela fixação dos mesmos através da formação do sal de Friedel. Como as propriedades do concreto contendo cimento Portland são resultados das reações químicas entre os componentes do cimento e a água, as diferenças existentes na composição do cimento repercutem nas propriedades do concreto.

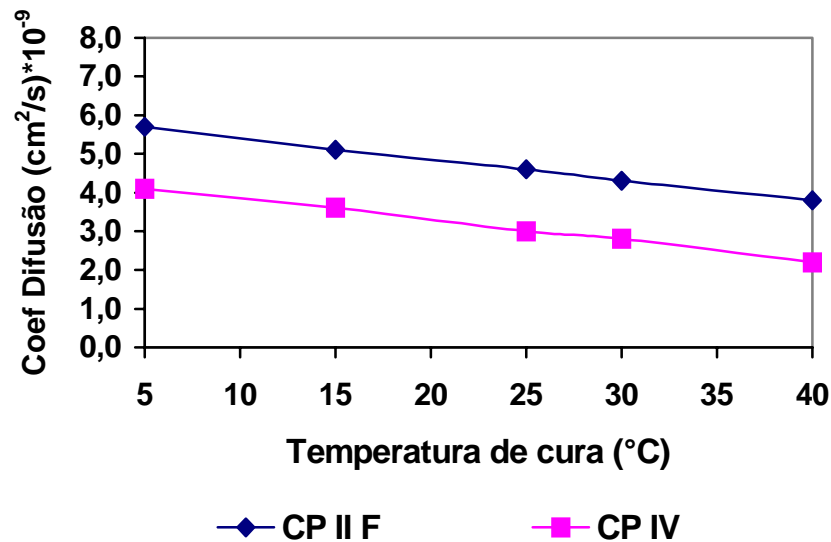
Muitos pesquisadores (MANGAT e MOLLOY, 1994; TUMIDAJSKI et al., 1995; NEVILLE, 1997) encontraram que o coeficiente de difusão de cloretos varia com o tempo, porque o sistema de poros do concreto varia com o tempo, especialmente com a evolução da hidratação.

Segundo IRASSAR et al. (2000), os concretos confeccionados com cimento contendo adição de fíler calcário não são adequados para o uso em ambientes agressivos contendo cloretos. Já para FREY et al. (1994), os concretos produzidos com cimento contendo cinza volante reduzem o valor do coeficiente de difusão de cloretos dos concretos, por apresentarem uma estrutura de poros mais densa.

De acordo com RAUPACH, citado por FIB BULLETINS (1999), o coeficiente de difusão de cloretos diminui com o aumento do tempo de cura. Para FREY et al. (1994), a porosidade dos concretos diminui com o passar do tempo e, portanto, o coeficiente de difusão de cloretos também.

#### **4.1.3 Efeitos isolados da temperatura de cura e do tipo de cimento sobre a migração de cloretos no concreto**

O gráfico que representa a migração de cloretos em função da temperatura de cura e do tipo de cimento foi obtido a partir da equação 4.4, variando os valores codificados da temperatura de cura e do tipo de cimento, mantendo as demais variáveis no ponto médio. O respectivo gráfico pode ser visualizado na Figura 26.



**Figura 26** Efeitos isolados da temperatura de cura e do tipo de cimento sobre o coeficiente efetivo de difusão de cloretos

Constata-se, pela Figura 26, que, com o aumento da temperatura de cura, ocorre uma diminuição do coeficiente efetivo de difusão de cloretos no concreto, para os dois tipos de cimento. Isto ocorre, provavelmente, pela aceleração das reações de hidratação que originam uma estrutura mais densa devido a uma tendência de maior hidratação. O concreto confeccionado com o cimento CP IV apresentou menores coeficientes efetivos de difusão de cloretos em relação ao concreto confeccionado com o cimento CP II F. Provavelmente, por o efeito pozolânico dos concretos contendo CP IV ser muito benéfico, em termos de decréscimo do coeficiente de difusão, em relação ao efeito fíler dos concretos contendo CP II F.

HUSSAIN e RASHEEDUZZAFAR (1994) constataram que 30% de cinza volante misturada ao cimento provocou grande melhoria na estrutura física do concreto endurecido, refinando a distribuição do tamanho dos poros e reduzindo seus diâmetros. E, como consequência, diminuiu em torno de 39% o coeficiente de difusão de cloretos dos concretos produzidos com este tipo de cimento.

#### 4.2 PENETRAÇÃO ACELERADA DE CLORETOS

A avaliação da resistência do concreto à penetração do íon cloreto tem sido feita indiretamente por ensaios de desempenho do material. Como foi dito anteriormente, vários são os fatores que afetam a penetração dos íons cloreto no concreto. Dentre as variáveis estudadas nesta pesquisa constatou-se, através da equação 4.5, que as que exercem influência significativa nesta propriedade são a relação água/cimento ( $a/c$ ), a idade, a temperatura de cura (Temp), a interação do tipo de cimento (TCP) com a idade e a interação do tipo de cimento (TCP) com a temperatura (Temp), em ordem de importância.

Cabe ressaltar ainda que a penetração de cloretos no concreto foi avaliada pela carga total passante (Q), de acordo com a prescrição da ASTM C 1202/92.

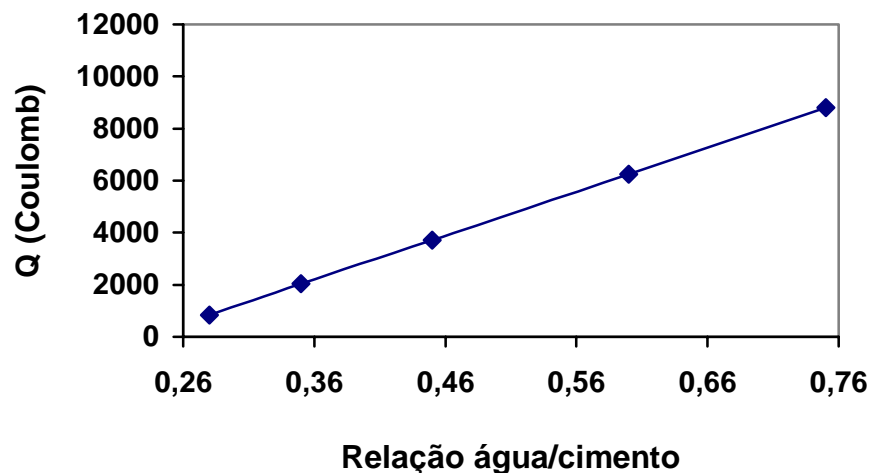
$$Q = 4817,01 + 3979,56 * ac - 2300,72 * Idade - 3236,73 * Temp - 1501,77 * TCP * Temp - 847,053 * TCP * Idade \quad (4.5)$$

A equação 4.5 foi obtida a partir da análise de regressão (ANEXO 4) dos resultados experimentais (ANEXO 2) e descreve o modelo ajustado de penetração de cloretos dos concretos confeccionados. O modelo possui um coeficiente de determinação  $r^2$  igual a 0,761, sendo importante lembrar que a equação foi ajustada para os níveis codificados das variáveis apresentados na Tabela 11.

Em alguns casos o aumento da temperatura devido à passagem de corrente (efeito Joule) foi considerável, causando um efeito secundário de incremento na carga total passante. Entretanto, a temperatura limite de 80°C não foi atingida, garantindo a continuidade do ensaio, conforme pode ser observado no ANEXO 2.

#### 4.2.1 Efeito isolado da relação água/cimento sobre a penetração acelerada de cloretos no concreto

O efeito isolado da relação água/cimento sobre a penetração de cloretos no concreto pode ser visualizado na Figura 27. Esse efeito isolado da relação água/cimento foi calculado com base na equação 4.5, variando os níveis codificados em função dos pontos médios codificados das outras variáveis.



**Figura 27** Efeito isolado da relação água/cimento sobre a carga total passante

No gráfico da Figura 27, pode-se observar que, quanto maior a relação água/cimento, maior é a carga total passante, ou seja, maior é a penetração de cloretos no concreto. Como já foi mencionado no item 2.5.4.1, a relação água/cimento tem grande importância nesta propriedade por influenciar o tamanho e a interconectividade dos poros do concreto, facilitando ou impedindo o deslocamento dos íons cloretos no mesmo. Também se constatou, através do gráfico, que o tipo de cimento não tem influência significativa na carga total passante, independente da relação água/cimento utilizada, ou seja, os efeitos das outras variáveis são bem mais pronunciados.

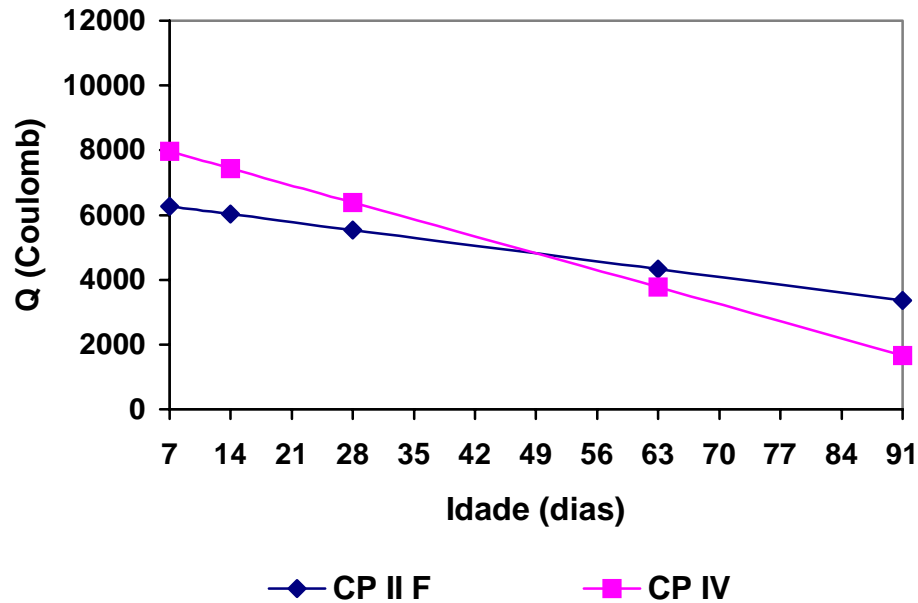
Em uma pasta endurecida de cimento, o tamanho e continuidade dos poros são considerados uns dos principais fatores controladores do ingresso de cloretos. Por isso, a água adicionada é indiretamente responsável por esta penetração de cloretos na pasta endurecida de cimento, pois determina primeiramente o espaço total e, depois que a água for consumida pelas reações de hidratação ou evapore para o ambiente, o espaço vazio. Portanto, quando a relação água/cimento é alta a pasta terá alta porosidade capilar, contendo um número relativamente elevado teor de poros grandes e bem conectados e, assim, estará sujeita a uma maior penetração de agentes agressivos.

Constata-se, pela Figura 27, que houve um crescimento na carga passante de cerca de 9 vezes, quando aumentou-se a relação água/cimento de 0,28 para 0,75. FRANCINETE JR. e CASCUDO (2000), analisando a penetração de íons cloretos, de acordo com a ASTM C 1202/92, em concretos confeccionados com relação água/cimento variando de 0,35 a 0,45, 0,55 e 0,65, encontraram que a carga passante deste ensaio aumentou cerca de, 16, 21 e 39% respectivamente, com o crescimento da relação água/cimento. WEE et al. (1999), estudando a penetração de cloretos em concreto com relação água/cimento de 0,40, 0,50 e 0,60, concluíram também que a carga total passante aumenta 71% com a elevação da relação água/cimento.

#### **4.2.2 Efeitos da idade e do tipo de cimento sobre a penetração acelerada de cloretos no concreto**

A ação dos efeitos da idade e do tipo de cimento foi calculada levando em consideração a variação dos níveis codificados desta variável e do tipo de cimento, mantendo as demais variáveis no ponto médio codificado. Com isso, foi possível verificar também a interação da idade com o tipo de cimento, identificada já na construção do modelo de comportamento, observado na equação 4.5.





**Figura 28** Efeitos da idade e do tipo de cimento sobre a carga total passante

No gráfico da Figura 28 pode ser visualizado este efeito, no qual é possível observar a diminuição da penetração de cloretos no concreto com o aumento da idade, para ambos os tipos de cimento, ocasionada pela evolução da hidratação com o decorrer do tempo.

WEE et al. (1999), estudando a penetração de cloretos em concreto com relação água/cimento de 0,50 e 0,60, concluíram que a carga total passante diminui 22 e 37%, respectivamente, com o avanço da idade. GASTALDINI e ISAIA (2000), verificando a resistência à penetração de cloretos, em concretos produzidos com as mesmas relações água/cimento dos concretos confeccionados por Wee et al., também encontraram que o aumento da idade, de 28 para 91 dias, resulta numa diminuição de 28 e 33%, respectivamente, da corrente passante.

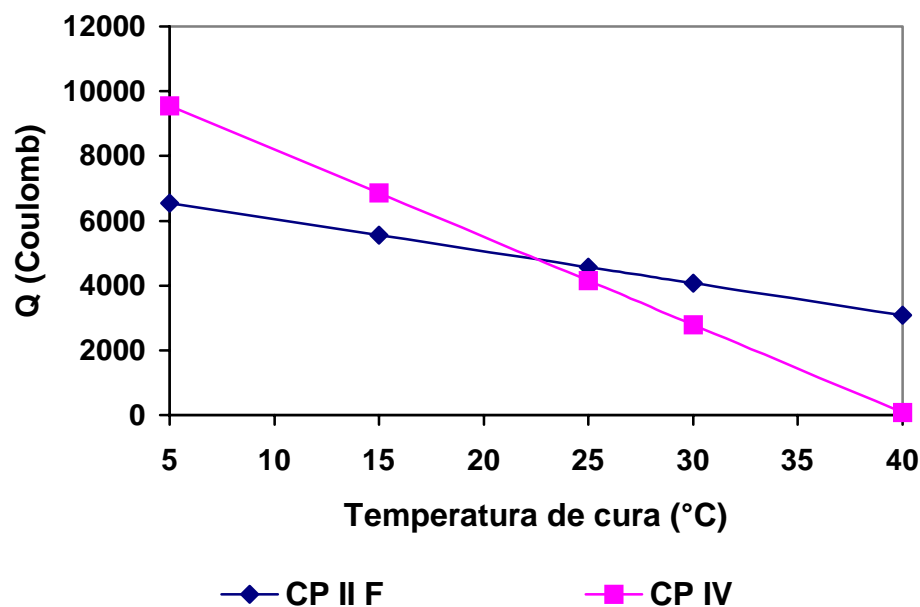
Pode-se notar também que a idade influencia mais o concreto confeccionado com cimento CP IV, que, para menores idades, apresenta uma penetração de cloretos maior do que o concreto contendo cimento CP II F. Porém, para idades mais avançadas, em torno de 50 dias, esta situação se inverte e o concreto com cimento CP IV passa a apresentar uma carga passante menor que o concreto produzido com cimento CP II F. Percebe-se que, com o decorrer do tempo, há uma diminuição da carga passante de 99%, para os concretos produzidos com o cimento CP IV, e que para os concretos confeccionados com o cimento CP II F, essa redução é de apenas 46%. Isso, provavelmente, é consequência da reação pozolânica, caracterizada como uma reação lenta, que leva a um efeito de refinamento dos poros que é mais significativo com o tempo, influenciando assim nos resultados. E já para o fíler, observa-se que não há um desenvolvimento muito grande com o decorrer do tempo. Desta

análise pode-se constatar que a influência do tipo de cimento no controle da penetração de cloretos é mais evidente ao longo do tempo, e que pode ser observado uma inversão de comportamento dos concretos, demonstrada pela influência significativa da interação da idade com o tipo de cimento.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), com o prosseguimento da hidratação o espaço vazio entre as partículas de cimento começa a ser preenchido gradativamente pelos produtos de hidratação, com uma redução progressiva do tamanho dos poros e perda de sua interconexões, diminuindo a penetração de cloretos.

#### 4.2.3 Efeitos da temperatura de cura e do tipo de cimento sobre a penetração acelerada de cloretos no concreto

Na Figura 29 pode ser visualizado o efeito isolado da temperatura de cura sobre a penetração de cloretos nos concretos. Os valores para a montagem do gráfico foram obtidos a partir da equação 4.5, variando os valores codificados da temperatura de cura e do tipo de cimento, mantendo as demais variáveis no seu ponto médio. Entretanto, como houve uma interação significativa, constatada no modelo, da temperatura com o tipo de cimento, este efeito também pode ser visualizado no gráfico da Figura 29, pois os níveis codificados dos cimentos também foram variados assim como os da temperatura de cura.



**Figura 29** Efeitos da temperatura de cura e do tipo de cimento sobre a carga passante

Pode-se visualizar, na Figura 29, que a carga passante diminui com o aumento da temperatura de cura, para os dois tipos de cimento utilizados no concreto. Provavelmente, devido à aceleração nas

reações de hidratação dos compostos ocasionada pela elevação da temperatura de cura, promovendo assim uma estrutura mais densa e menos permeável aos cloretos.

Entretanto, para temperaturas abaixo de 22°C a penetração de cloretos é maior para os concretos produzidos com cimento CP IV, enquanto para temperaturas mais elevadas, os concretos contendo cimento CP II F apresentam uma penetração de cloretos maior. Observa-se, também, uma tendência de diminuição da penetração de cloretos mais rápida no concreto confeccionado com o cimento CP IV, ou seja, a temperatura parece influenciar menos os concretos produzidos com o cimento CP II F, que evidencia o efeito significativo da interação da temperatura com o tipo de cimento. Isto pode ocorrer porque a hidratação dos concretos produzidos com CP IV são lentas, especialmente as reações pozolânicas secundárias, e a baixas temperaturas, essas reações são retardadas, ficando ainda mais demoradas. Portanto, pode-se concluir que as reações pozolânicas são mais influenciadas pela temperatura que as reações de hidratação do cimento.

Confrontando-se os resultados obtidos com aqueles constantes na norma ASTM C 1202/92, que classifica os concretos a partir dos resultados de carga passante, em Coulombs, observa-se que, com exceção dos concretos produzidos com o cimento CP IV, submetidos a ambientes de cura de 40 e 30°C, e os confeccionados com cimento CP II F, colocados em ambiente de cura de 40°C, cujos valores se enquadram como desprezível e moderada permeabilidade a cloreto, respectivamente, as demais misturas, observadas na Figura 29, apresentaram valores que se classificam como indicativos de alta permeabilidade a cloretos.

Também se pode observar que o concreto confeccionado com o cimento CP IV, e submetido a uma temperatura de cura de 25°C, apresenta uma carga passante de aproximadamente duas vezes inferior ao concreto produzido com o mesmo cimento e submetido a uma temperatura de cura de 5°C. Já para os concretos produzidos com o cimento CP II F, comportamento semelhante foi encontrado nos concretos submetidos a temperaturas de cura de 5 e 40°C, com a carga passante do primeiro ficando em torno de duas vezes superior à do segundo. Verificam-se os comportamentos diferentes em relação à penetração acelerada de cloretos dos concretos produzidos com os dois distintos tipos de cimento, evidenciando o efeito significativo da interação da temperatura com o tipo de cimento nesta propriedade.

#### 4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A análise de regressão múltipla realizada com os resultados de resistência à compressão axial (ANEXO 1) obtidos com os concretos mostrou que, em ordem de importância, os efeitos da relação água/cimento ( $a/c$ ), idade, temperatura de cura (Temp), da interação entre a relação água/cimento e a

temperatura e do tipo de cimento (TCP) apresentaram efeito significativo sobre a resistência à compressão axial.

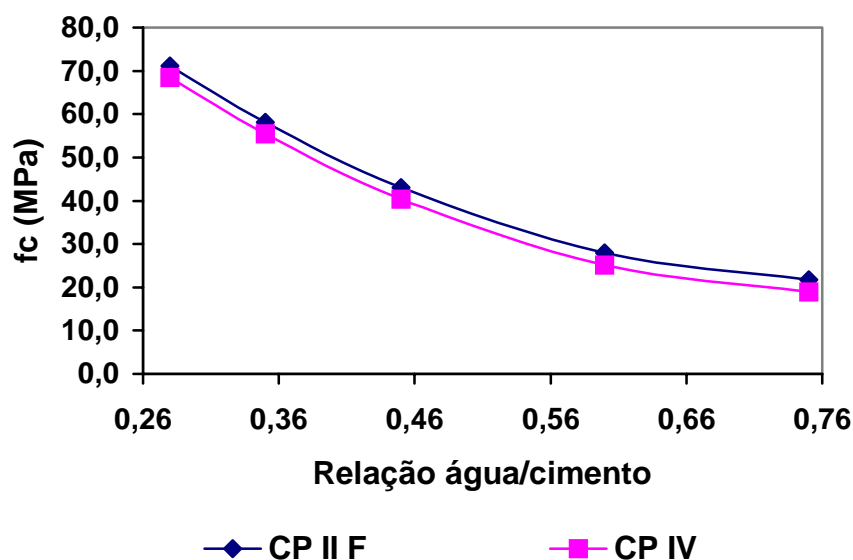
Como foi mencionado anteriormente, a análise de regressão múltipla (ANEXO 4) com o auxílio do programa Statgraph, fornece a equação ajustada para a modelagem das curvas de comportamento do material, e a expressão resultante da análise, para os níveis codificados apresentados na Tabela 11, é a seguinte:

$$f_c = 33,9939 - 24,6967 * a / c + 7,72409 * Idade + 11,0997 * ac^2 - 5,27383 * Idade^2 - 1,37023 * TCP + 3,59965 * Temp - 7,05202 * ac * Temp \quad (4.6)$$

Na equação 4.6 aparecem apenas os termos que exercem influência significativa sobre a propriedade avaliada. Foi obtido um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,961$  para o modelo. Observa-se também que, na equação ajustada do modelo, a relação água/cimento e a idade aparecem elevados ao quadrado. Isto ocorreu para que o gráfico ficasse com um formato de curva.

#### 4.3.1 Efeitos isolados da relação água/cimento e do tipo de cimento sobre a resistência à compressão axial do concreto

A Figura 30 apresenta a tendência do comportamento dos efeitos isolados da relação água/cimento e do tipo de cimento sobre a resistência à compressão axial do concreto. O gráfico foi obtido variando os valores codificados da relação água/cimento e do tipo de cimento, mantendo as demais variáveis no ponto médio do intervalo codificado de cada uma delas.



**Figura 30** Resistência à compressão axial em função dos efeitos isolados da relação água/cimento e do tipo de cimento

Através do gráfico é possível observar que a resistência à compressão do concreto tende a diminuir à medida que o valor da relação água/cimento aumenta, conforme o esperado. O que vem a confirmar a teoria de Abrams (1918) que a resistência à compressão apresenta um comportamento inverso à relação água/cimento. Constata-se também que quando a relação água/cimento, para os concretos produzidos com o cimento CP II F, aumenta de 0,28 para 0,75 a resistência à compressão dos concretos diminui cerca de 69%, já para os concretos produzidos com o cimento CP IV, esta redução é de 72%, para a elevação da relação água/cimento de 0,28 para 0,75.

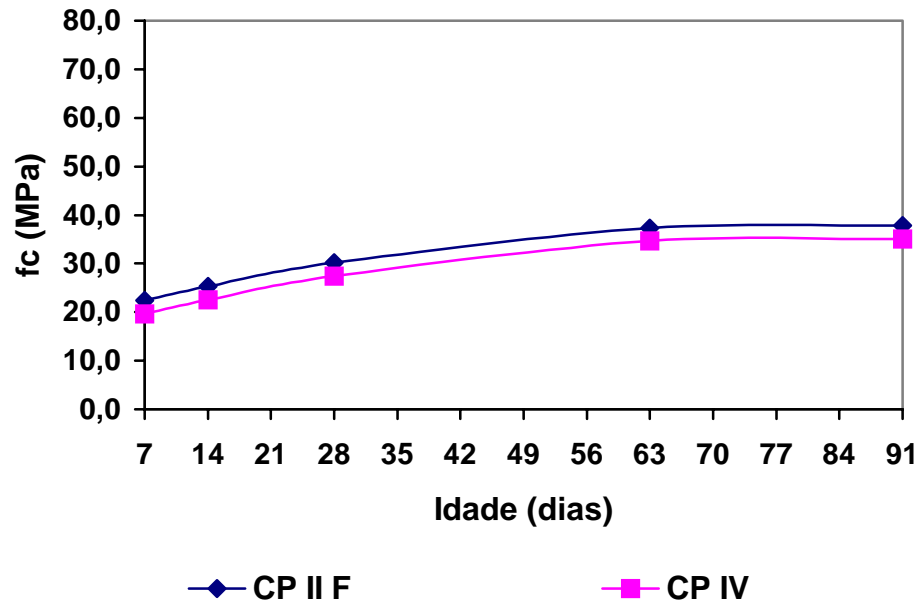
De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), a relação água/cimento é o fator mais importante a influenciar a resistência à compressão dos concretos, por afetar tanto a porosidade da pasta de cimento como a zona de transição entre a pasta e o agregado. Segundo os mesmos autores a fonte principal da resistência é a atração das forças de Van Der Waals entre as partículas, que são inversamente proporcionais às distâncias. Assim menores distâncias levam a forças mais intensas que culminam em resistências mecânicas maiores.

Na Figura 30, nota-se também que a resistência dos concretos produzidos com cimento CP II F são maiores que as dos concretos confeccionados com cimento CP IV. Provavelmente, isto deve-se ao fato do concreto contendo cimento CP II F hidratar-se mais rapidamente que o concreto com cimento CP IV. Portanto um concreto contendo cimento CP II F terá maior resistência que um concreto contendo cimento CP IV. Além disso, nos ensaios de caracterização dos cimentos (Tabela 4 e Tabela 5) é possível observar que a resistência aos 28 dias do CP II F é, aproximadamente, 15% superior à resistência do CP IV. Diferença similar foi também encontrada nos concretos produzidos.

#### **4.3.2 Efeitos isolados da idade e do tipo de cimento sobre a resistência à compressão axial do concreto**

Apesar da relação água/cimento, como visto no item 4.3.1, ser considerada o fator de maior importância na determinação da resistência do concreto, fatores como tempo e temperatura de cura, grau de hidratação, dentre outros, podem também ter um efeito importante sobre a resistência, como será visto a seguir.

A tendência de comportamento da resistência à compressão do concreto, sob a influência dos efeitos isolados da idade e do tipo de cimento, pode ser visualizada na Figura 31. Os dados para plotagem do gráfico foram obtidos a partir do cálculo da resistência, variando os níveis codificados da idade e do tipo de cimento, mantendo as demais variáveis no ponto médio codificado.



**Figura 31** Resistência à compressão axial em função dos efeitos isolados da idade e do tipo de cimento

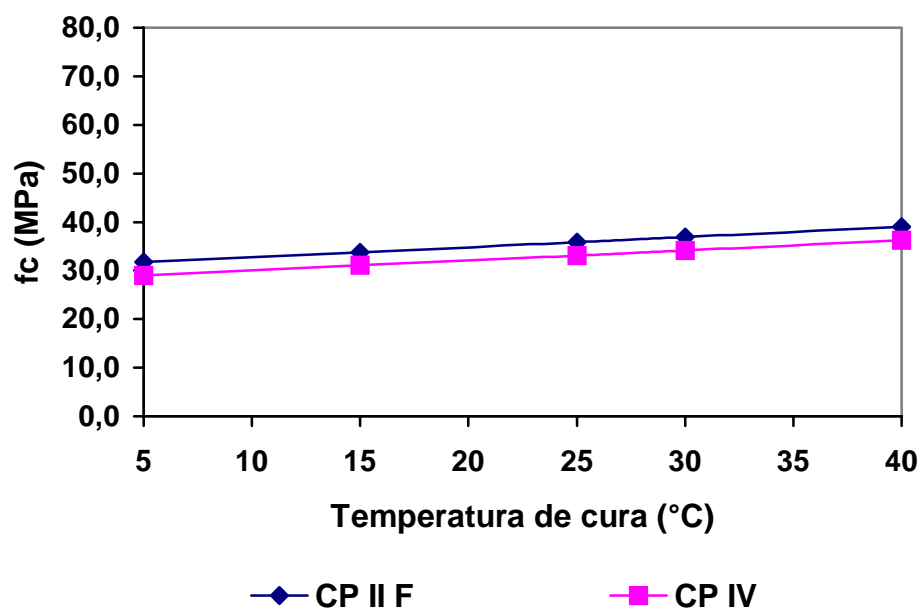
Verifica-se, através da Figura 31, que a resistência à compressão axial dos concretos confeccionados aumenta com a elevação da idade. Isto ocorre porque a hidratação das partículas de cimento anidro continua ocorrendo, diminuindo o volume de poros grandes na pasta de cimento hidratada. Essa tendência era esperada, já que é consenso em tecnologia do concreto. Entretanto, esperava-se que os concretos produzidos com o cimento CP IV tivessem um ganho maior de resistência, já que a reação pozolânica é considerada lenta, onde sua influência é mais significativa com o decorrer do tempo. Verificou-se que os concretos confeccionados com o cimento CP IV apresentaram um ganho de resistência, com o aumento da idade de 7 para 91 dias, de apenas 79%; já os concretos produzidos com o cimento CP II F, esta elevação com a idade foi de 68%, considerada normal para este tipo de cimento. Cabe frisar que as diferenças entre as resistências dos concretos confeccionados não foram maiores, como o esperado, devido a composição química destes cimentos. Pois verifica-se na mesma que os dois tipos de cimentos utilizados apresentaram teores de  $C_2S$  e  $C_3S$  próximos, além do cimento CP IV ser muito mais fino que o usualmente encontrado.

Constata-se também que há um crescimento maior da resistência até os 63 dias e que, a partir desta idade, o ganho de resistência não é tão grande quando comparado com as idades menores. SABIR e WILD (2000), estudando o efeito da idade na resistência dos concretos confeccionados, constataram que até, os 28 dias de idade a resistência aumenta consideravelmente e, após este valor, e até os 90 dias, a resistência cresce mais lentamente. Para RAMEZANIANPOU e MALHOTRA (1995),

comportamento semelhante foi encontrado, onde as resistências dos concretos produzidos crescem substancialmente a pequenas idades e com o decorrer do tempo este aumento vai se tornando menor.

#### 4.3.3 Efeitos isolados da temperatura de cura e do tipo de cimento sobre a resistência à compressão axial do concreto

Assim como para a relação água/cimento e idade, a ação dos efeitos isolados da temperatura de cura e do tipo de cimento foram calculados levando em consideração a variação dos níveis codificados destas variáveis e do tipo de cimento, mantendo as demais variáveis no ponto médio codificado.



**Figura 32** Resistência à compressão axial em função dos efeitos isolados da temperatura de cura e do tipo de cimento

No gráfico da Figura 32 é possível observar o aumento da resistência do concreto com o aumento da temperatura de cura. Provavelmente isto ocorre devido à aceleração das reações de hidratação causada pelas temperaturas mais elevadas, ocasionando uma estrutura mais densa. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por RANC et al. (1991), que confeccionaram e curaram concretos a temperaturas de cura de 10, 20 e 35°C e, encontraram que a resistência à compressão aumenta com o aumento da temperatura de cura. Outros autores (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; COUTINHO e GONÇALVES, 1994) também constataram que, para os concretos lançados a 21°C e curados a temperaturas diferentes (-9, 0, 10 e 21°C), as resistências maiores foram obtidas com os concretos submetidos às maiores temperaturas, pois como as reações de hidratação dos compostos de cimento Portland são lentas, é necessário manter níveis adequados

de temperatura para proporcionar a energia de ativação necessária para as reações e, conseqüente, o desenvolvimento da resistência, já que o mesmo está associada ao preenchimento dos vazios com os produtos de hidratação.

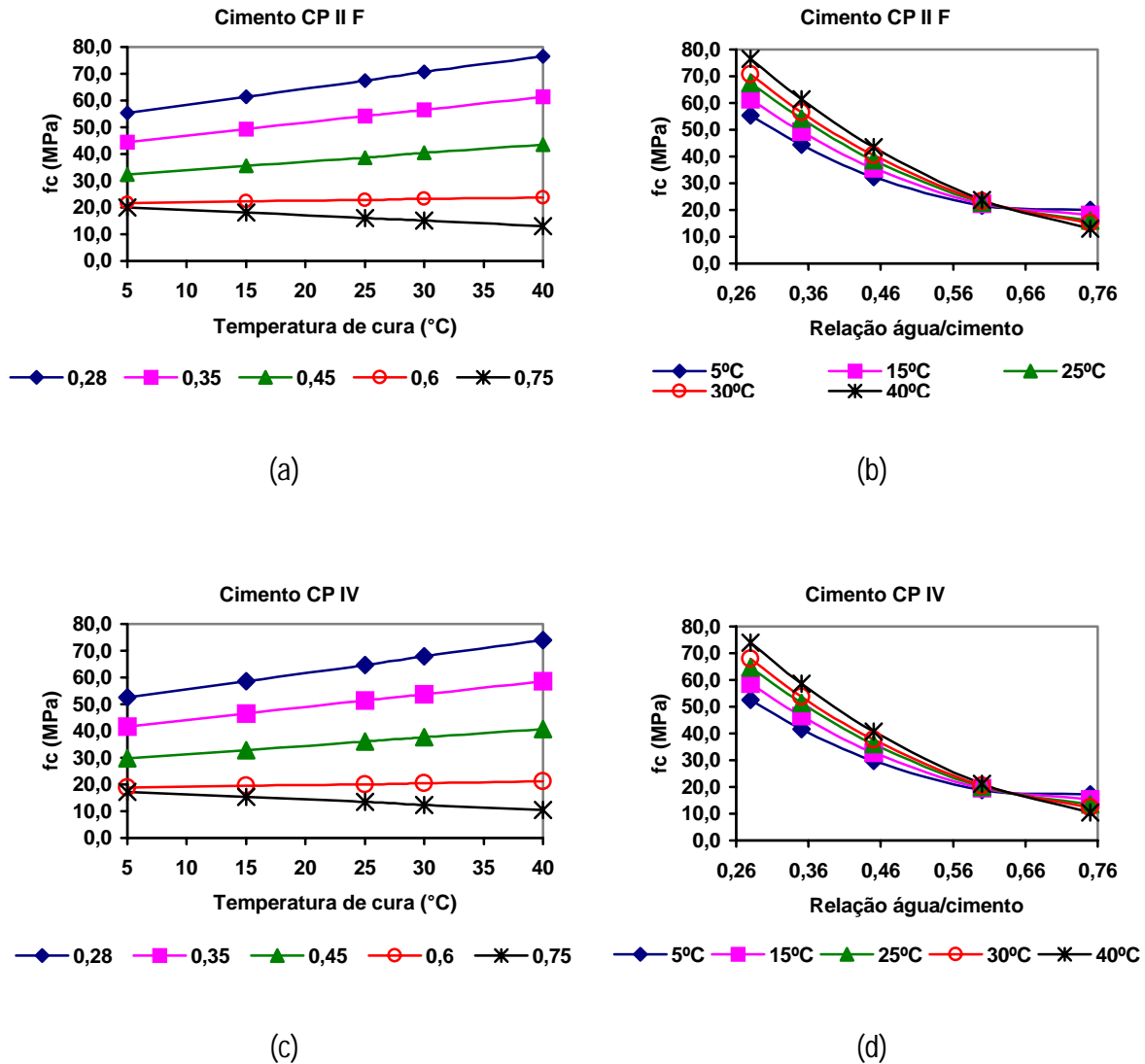
SABIR e WILD (2000) avaliaram a influência da temperatura (20, 35 e 50°C) sobre a resistência, em concretos confeccionados com adição de cinza volante. Encontraram como temperatura ótima o valor de 35°C, pois com essa temperatura os concretos produzidos apresentaram maiores resistências tanto nas primeiras idades como nas idades mais avançadas. Os autores atribuem este ganho à aceleração das reações de hidratação.

Também pode-se visualizar que o concreto produzido com o cimento CP II F apresenta resistência superior à do concreto produzido com cimento CP IV. Confirmando, que, para todos os efeitos isolados estudados, os concretos confeccionados com o cimento CP II F sempre apresentaram resistências maiores. O que indica que quando se deseja trabalhar com resistências mais elevadas, quando utiliza-se apenas estes dois tipos de cimento estudados neste trabalho, o cimento CP II F é mais indicado que o cimento CP IV. Entretanto, deve-se ressaltar que esta afirmativa não leva em consideração qualquer outra propriedade do concreto, como por exemplo a durabilidade, se referindo apenas à resistência à compressão de forma isolada.

#### **4.3.4 Efeito da interação relação água/cimento x temperatura de cura sobre a resistência à compressão axial do concreto**

O gráfico que representa a resistência à compressão em função da temperatura de cura foi obtido a partir da equação 4.6 variando os valores codificados de temperatura de cura dos corpos-de-prova para cada relação água/cimento, também codificada e mantendo as demais variáveis no ponto médio, com exceção do cimento que, dependendo do tipo, permaneceu no mesmo ponto. O mesmo foi feito para obtenção do gráfico da resistência à compressão em função da relação água/cimento. Os respectivos gráficos podem ser visualizados na Figura 33.





**Figura 33** Resistência à compressão em função do efeito da interação relação água/cimento x temperatura de cura: a) Gráfico de  $f_c$  (temperatura de cura) para o CP II F; b) Gráfico  $f_c$  (relação água/cimento) para o CP II F; c) Gráfico de  $f_c$  (temperatura de cura) para o CP IV; d) Gráfico  $f_c$  (relação água/cimento) para o CP IV

Através dos gráficos pode-se observar que, quanto menor a relação água/cimento, maior é a resistência à compressão, para temperaturas de cura mais elevadas. Em contrapartida, para relações água/cimento maiores que cerca de 0,60 o comportamento se inverte. Quanto menor a temperatura, maior a resistência obtida, para os dois tipos de cimento estudados (Figura 33b e d). Na realidade, pode-se dividir o gráfico da Figura 33b e d em três faixas distintas, para os concretos confeccionados para os dois tipos de cimento:

- faixa 1 – valores de relação água/cimento menores que aproximadamente 0,60, na qual, quanto maior a temperatura, maior a resistência à compressão;

- faixa 2 – valores de relação água/cimento compreendidos entre 0,60 e 0,70, aproximadamente, na qual para qualquer temperatura os valores de resistência são aproximadamente iguais;
- faixa 3 – valores de relação água/cimento maiores que aproximadamente 0,70, na qual quanto menor a temperatura maior a resistência.

Provavelmente, o que aconteceu foi que, após a retirada da embalagem dos corpos-de-prova aos 14 dias, os concretos com relações água/cimento mais altas estavam com suas estruturas pouco desenvolvidas e muito porosas. Quando submetidos a temperaturas de cura mais elevadas, a água dos poros pode ter se evaporado e a hidratação não foi suficiente, ocasionando assim uma menor resistência. Já para os concretos que tinham desenvolvido uma parcela maior de resistência, estando sua estrutura mais densa, a água, provavelmente, não evaporou e a hidratação pode prosseguir. Aliado a este fator, ainda pode ter ocorrido retração e microfissuração nos concretos expostos a temperaturas mais elevadas, o que ocasionaria redução da resistência à compressão.

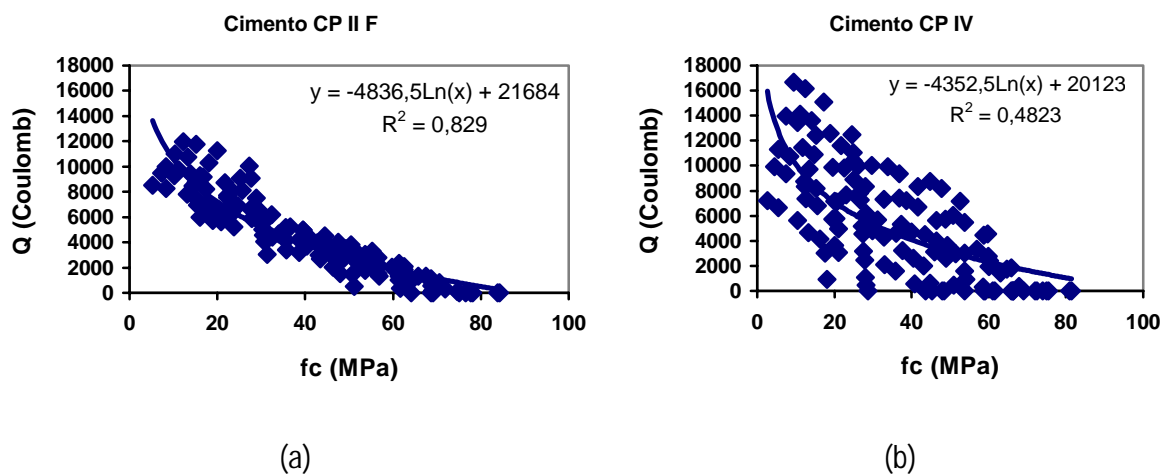
Ainda, pode ser observado, que para os concretos produzidos com o cimento CP II F a taxa de decréscimo da resistência com o aumento da temperatura de cura para relações água/cimento maiores que cerca de 0,60 é menor (cerca de 27%, para  $a/c = 0,75$ , quando a temperatura de cura varia de 5 a 40°C) que a taxa de crescimento da resistência apresentada para valores baixos de relação água/cimento (cerca de 35%, para  $a/c = 0,28$ , quando a temperatura de cura varia de 5 a 40°C) (Figura 33a). Já para os concretos produzidos com o cimento CP IV a taxa de decréscimo da resistência com o aumento da temperatura de cura para relações água/cimento maiores que cerca de 0,60 é menor (cerca de 31%, para  $a/c = 0,75$ , quando a temperatura de cura varia de 5 a 40°C) que a taxa de crescimento da resistência apresentada para valores baixos de relação água/cimento (cerca de 37%, para  $a/c = 0,28$ , quando a temperatura de cura varia de 5 a 40°C). O que era de se esperar, que a temperatura de cura tivesse uma influência maior nos concretos produzidos com o cimento CP IV, já que as reações de hidratação destes concretos são mais lentas, devido à reação pozolânica.

Constata-se, também, que a diferença dos gráficos com cimento CP II F para o com cimento CP IV está no valor da resistência à compressão. Para os concretos produzidos com o cimento CP II F (Figura 33a), a resistência à compressão é maior que nos concretos produzidos com o cimento CP IV (Figura 33c).

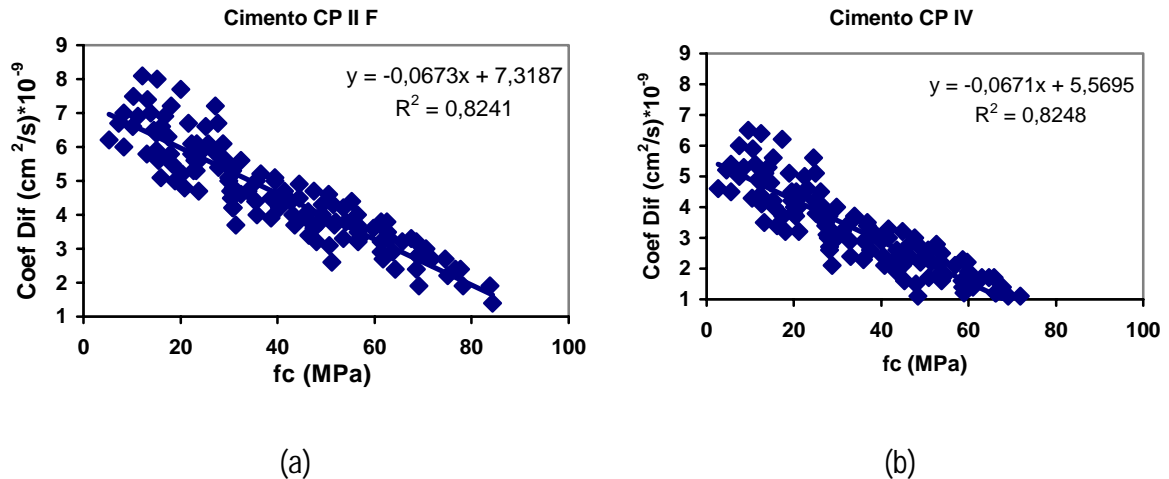
#### 4.4 CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E OS OUTROS PARÂMETROS

Com os dados obtidos nesse trabalho, decidiu-se plotar um gráfico que relacionasse a resistência à compressão à carga total passante e ao coeficiente efetivo de difusão de cloretos (Figura 34 e Figura 35). Essas correlações fornecem o comportamento do ingresso de cloretos dos concretos produzidos à medida em que se eleva a resistência dos mesmos. Para o cálculo dos valores plotados nos gráficos utilizou-se a equação 4.4, para a resistência à compressão, 4.5, para a carga passante e 4.6, para o coeficiente de difusão de cloretos. É importante lembrar que foram substituídos nas equações os respectivos valores codificados de cada variável utilizada e que os mesmos estão apresentados na Tabela 11.

A partir dos dados da resistência à compressão, carga passante e coeficiente de difusão de cloretos foram definidos os modelos que relacionam resistência à compressão com carga total passante e resistência à compressão com coeficiente de difusão de cloretos. Foram calculados os 125 resultados de resistência à compressão, carga total passante e coeficiente de difusão de cloretos correspondentes às 125 combinações possíveis das variáveis independentes definidas no programa experimental, para cada tipo de cimento estudado.



**Figura 34** Relação entre a carga total passante e a resistência à compressão: a) para o cimento CP II F; b) para o cimento CP IV



**Figura 35** Relação entre o coeficiente de difusão de cloretos e a resistência à compressão: a) para o cimento CP II F; b) para o cimento CP IV

A Figura 35a e b mostra que houve boa correlação estatística da resistência à compressão com o coeficiente efetivo de difusão de cloretos ( $r^2 = 82\%$ ), para os dois tipos de cimento analisados. Na Figura 34a, pode-se observar também que houve uma boa relação entre a resistência à compressão e a penetração de cloretos ( $r^2 = 83\%$ ) apenas nos concretos confeccionados com o cimento CP II F, pois os concretos fabricados com o cimento CP IV (Figura 35b) obtiveram uma baixa correlação entre estes parâmetros ( $r^2 = 48\%$ ). Deve-se ressaltar que o coeficiente de determinação,  $r^2$ , obtido para o modelo de resistência à compressão *versus* penetração de cloretos, dos concretos produzidos com o cimento CP IV, é considerado muito baixo. Deste modo, pode-se concluir que não há correlação confiável, para este tipo de cimento.

Percebe-se, através dos gráficos, que, em geral, quando a resistência à compressão aumenta, o coeficiente de difusão e a penetração de cloretos diminuem. Para os concretos confeccionados com o cimento CP II F, o aumento da resistência de 20 MPa para 40 MPa ocasionou um decréscimo no coeficiente efetivo de difusão de cloretos de aproximadamente 23%. O mesmo acréscimo na resistência acarretou em uma redução substancial na carga total passante, em torno de 50%.

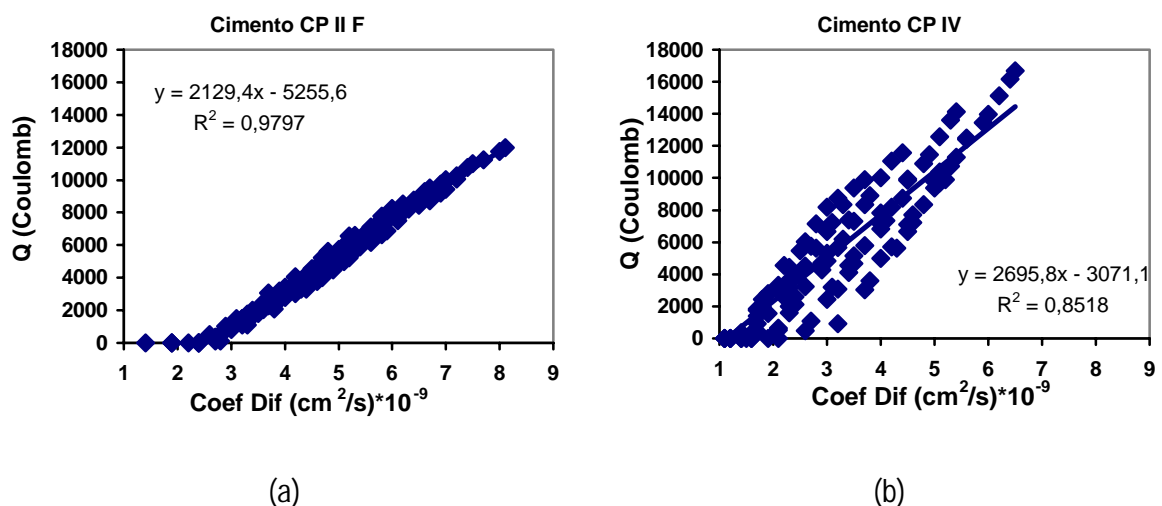
Entretanto, nota-se que, para uma resistência fixada em 40 MPa, por exemplo, pode-se obter um coeficiente efetivo de difusão de  $4,63 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ , para os concretos produzidos com cimento CP II F, e um coeficiente de difusão de  $2,89 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ , para os concretos confeccionados com o cimento CP IV, ou seja, uma diferença de quase o dobro do primeiro para o segundo coeficiente de difusão de cloretos. Portanto, provavelmente, a resistência à compressão não pode ser um parâmetro considerado isoladamente para representar a eficiência do concreto frente à penetração de íons cloretos e, conseqüentemente, em termos de durabilidade.

Além disso, pode-se observar que, na resistência à compressão, os concretos produzidos com o cimento CP II F apresentaram melhores resultados que os concretos confeccionados com o cimento CP IV. Contudo, na avaliação da penetração de cloretos os resultados alcançados foram o inverso, os concretos produzidos com CP IV apresentaram melhor resistência à penetração de cloretos. Provavelmente, isto se deve às características da adição utilizada no cimento CP IV, sendo sua influência mais significativa na carga passante e no coeficiente de difusão de cloreto do que na resistência à compressão.

ISAIA (1995), BARATA (1998) e FERREIRA (1999) também correlacionaram resistência à compressão e penetração de cloretos e constataram que a carga passante diminui quando a resistência aumenta. Porém, os autores ressaltam que o aumento da resistência à compressão não está diretamente relacionada com a melhoria das propriedades que avaliam a durabilidade. Pois, na análise de outras propriedades relacionadas com a durabilidade, os resultados não foram satisfatórios.

#### 4.5 COMPARAÇÃO ENTRE O ENSAIO DE PENETRAÇÃO E O DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS

Decidiu-se fazer uma correlação entre o ensaio proposto por ANDRADE (1993) e o especificado pela ASTM C 1202/92. Foram calculados os resultados da carga total passante, através da equação 4.5, e os resultados de coeficiente de difusão de cloretos, através da equação 4.6, para as 125 combinações possíveis entre os valores codificados das variáveis para cada tipo de cimento, apresentados na Tabela 11. Com os resultados obtidos foi definido o gráfico, apresentado na Figura 36.



**Figura 36** Relação entre a carga total passante e o coeficiente de difusão de cloretos: a) para o cimento CP II F; b) para o cimento CP IV

A Figura 36a mostra que houve boa correlação estatística da carga passante com o coeficiente efetivo de difusão de cloretos ( $r^2 = 97\%$ ), para os concretos produzidos com o cimento CP II F. Na Figura 36b, pode-se observar também que houve uma boa relação entre a carga passante e o

coeficiente efetivo de difusão de cloretos ( $r^2 = 85\%$ ), para os concretos confeccionados com o cimento CP IV. Percebe-se ainda através da análise dos gráficos, que, em geral, quando a carga total passante aumenta o coeficiente de difusão de cloretos também aumenta.

UEMOTO et al., citados por LOPES (1999), estabeleceram uma correlação linear positiva entre a medida de corrente e o teor de cloretos migrados para a célula positiva, encontrando um coeficiente de correlação de  $r^2 = 0,94$ . GUTIERREZ, citado por GUIMARÃES (1997), afirma que existe uma boa correlação entre a carga em coulombs e o logaritmo do coeficiente de difusão. ROY, citado por GUIMARÃES (1997), afirma que há uma proporcionalidade entre a carga total que atravessa o corpo-de-prova e a concentração de cloretos

A correlação feita entre os dois ensaios é importante do ponto de vista da praticidade, pois o procedimento onde se monitora a concentração de cloretos na célula positiva é mais trabalhoso que monitorar apenas a corrente. Portanto se há a necessidade de verificar comparativamente o desempenho de um material quanto à sua resistência ao ataque por cloretos, não dispondo de tempo e do aparato para a determinação do teor de cloreto, a monitoração da intensidade de corrente responde satisfatoriamente. Entretanto, quando é fixada uma carga total passante de 4000 coulomb,, o valor do coeficiente efetivo de cloreto é quase um o dobro do outro, quando muda-se o tipo de cimento dos concretos produzidos de CP IV para CP II F.

Pode-se constatar ainda, nesse trabalho, que o método proposto por ANDRADE (1993) parece ser mais confiável e de maior precisão, pois conseguiu detectar a influência do tipo de cimento, enquanto que o método especificado pela ASTM C 1202/92 não detectou que esta variável influenciava na resistência à penetração de cloretos. Além disso, com este ensaio se tem uma análise apenas qualitativa dos concretos, enquanto que o valor do coeficiente de difusão reflete a resistência do concreto à penetração de cloreto, podendo ainda utilizar os gráficos de concentração de cloretos no tempo para o cálculo de um valor comparável ao do coeficiente aparente de difusão de cloretos, no estado não estacionário, o qual pode ser usado em modelos matemáticos para previsão de vida útil. Cabe ressaltar também que, no método proposto por ANDRADE (1993), mede-se apenas a concentração de íons cloretos que atravessam o corpo-de-prova, já no ensaio normatizado da ASTM C 1202/92 é medida a corrente, que corresponde a mobilidade de todos os íons, presentes na solução, e não apenas os cloretos.

Uma das desvantagens da utilização do ensaio proposto por ANDRADE (1993) é o tempo consumido para que a condição de fluxo estacionário seja atingida e que este volte ao estado não estacionário, podendo levar meses. Foi observado, também, com o desenvolvimento deste ensaio, que

houve a formação de compostos nas faces que ficaram expostas do corpo-de-prova. Tanto a face que ficou em contato com a solução contendo cloreto (Figura 37) como a face em contato com a água deionizada (Figura 38) apresentaram a cristalização de alguns compostos.



**Figura 37** Visualização das faces dos corpos-de-prova expostas a solução com cloretos

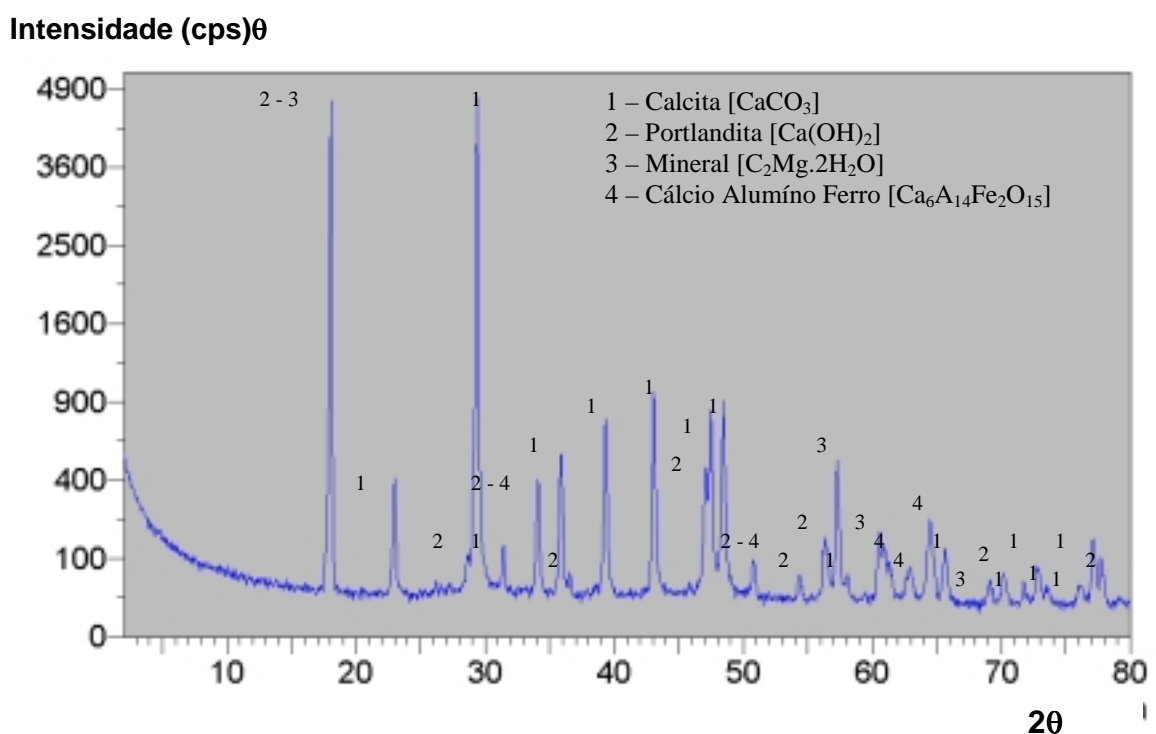


**Figura 38** Visualização das faces dos corpos-de-prova expostas a água deionizada

Pode-se verificar que a intensidade de formação destes compostos variou com o tempo a que ficaram expostos os corpos-de-prova e com o valor dos coeficientes de difusão de cloretos encontrados. Constatou-se que os corpos-de-prova que ficaram mais tempo submersos e os que tiveram coeficiente de difusão de cloretos maiores apresentaram uma maior formação de compostos. Acredita-se que estes compostos, presentes nos corpos-de-prova, não interferiram efetivamente no transporte dos íons no concreto e que os formados na face exposta à água deionizada foram

resultados da dissolução do eletrodo (barra de aço inox), presente neste recipiente, em virtude da corrosão desencadeada na barra pela presença de cloretos. Pois, de acordo com GENTIL (1996), apesar do aço inoxidável ser bastante resistente a vários meios corrosivos, o mesmo sofre corrosão localizada em presença do íon cloreto.

Com o intuito de saber qual o composto formado nas faces dos corpos-de-prova, expostos à solução com cloretos, durante o ensaio de migração, decidiu-se fazer uma análise de difração de raio X (DRX). Este ensaio foi realizado nos laboratórios de Geociências da UFRGS. A Figura 39 apresenta o difratograma de raio X de uma amostra da substância coletada do corpo-de-prova, após o término do ensaio de migração de cloretos.



**Figura 39** Difratograma da amostra coletada da face dos corpos-de-prova em contato com a solução com cloreto de sódio

O difratograma mostra a presença de hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio, ferro e magnésio. Provavelmente, durante a realização do ensaio de migração, o hidróxido de cálcio lixiviou dos corpos-de-prova. Acredita-se que o carbonato de cálcio pode ter se formado após o término do ensaio, já que os corpos-de-prova ficaram expostos ao ambiente, por um tempo razoável, até que pudesse ser realizada a difração. Já com relação ao ferro encontrado, provavelmente, este foi devido à contaminação dos compostos formados na face em que os corpos-de-prova ficavam expostos à água deionizada com os formados na face em contato com a solução com cloretos, após o término do ensaio.



Como pode ser observado, existem alguns questionamentos quanto à validade e aplicabilidade dos métodos atualmente disponíveis para medida de resistência do concreto à penetração de íons cloreto. Portanto, além destas, outras técnicas ainda devem ser melhor estudadas ou desenvolvidas no sentido de facilitar seu emprego e a confiabilidade dos resultados no meio técnico.

#### 4.6 PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DOS CONCRETOS ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS

Decidiu-se prever a vida útil dos concretos confeccionados devido à disponibilidade dos dados e, somado a isto, à existência de uma linha de pesquisa no NORIE que está voltada para este fim. Para tanto, utilizou-se um modelo matemático, já identificado por ANDRADE (2000b), para prever a vida útil dos concretos produzidos.

Na especificação de uma estrutura em concreto armado, fica implícito que esta deva apresentar uma durabilidade compatível com a vida útil da obra da qual faz parte. Assim sendo, seria fundamental que, ao definir-se a composição do concreto a ser empregado nesta estrutura, se pudesse estimar a vida útil desta estrutura em função das condições de agressividade a que estará exposta. Em função disto, um enfoque mais atual de estudar durabilidade é criar modelos de estimativa de vida útil baseado em resultados de estudos laboratoriais e de avaliação do desempenho de obras já construídas. Já existe um número razoável de modelos de vida útil para concreto (POULSEN, 1996; MANGAT et al., 1994; TANG et al., 1994; LIU, 1996, dentre outros).

De acordo com ANDRADE (2000b), existem basicamente dois grupos de modelos desenvolvidos para representar a degradação das estruturas, um relativo à corrosão das armaduras e outro à deterioração do concreto. Entretanto, os modelos relativos à corrosão das armaduras são os que estão sendo mais desenvolvidos, por ser o processo de maior índice de ocorrência nas estruturas de concreto armado e mais conhecido cientificamente, onde a carbonatação e o ataque por cloretos no concreto são os fenômenos que mais têm recebido atenção. Estes modelos estão divididos em dois períodos; no primeiro, denominado de período de iniciação da corrosão, os agentes agressivos penetram no concreto e despassivam a armadura, sem que ocorra perda da funcionalidade da estrutura; e no segundo, conhecido como período de propagação da corrosão, os agentes agressivos atuam destruindo a armadura, até chegar a um grau inaceitável do ponto de vista da segurança, funcionalidade ou estética da estrutura. Cabe ressaltar que estes modelos seguem a proposta de Tuutti para previsão de vida útil.

Contudo, focar-se-á apenas o modelo relacionado à penetração de cloretos no período de iniciação, pois os dados obtidos neste trabalho só permitem fazer esta modelagem.

#### 4.6.1 Procedimento

Para previsão da vida útil, na etapa de iniciação, foi utilizada a formulação baseada na resolução da segunda lei de Fick, apresentada no item 2.3.3, pela equação 2.11, por ser esta uma das mais empregadas para se modelar a penetração de íons para o interior do concreto (ANDRADE, 2000b). A segunda lei de Fick representa uma condição não estacionária (definida novamente neste item pela equação 4.7) e através desta pode-se prever a vida útil das estruturas de concreto armado.

$$\frac{C_{Cr}}{C_s} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_a \cdot t}}\right) \quad (4.7)$$

Onde:

$C_{Cr}$  – concentração crítica para despassivação, admitida constante (0,4% da massa do cimento);

$C_s$  – concentração do agente agressivo na superfície do concreto, admitida constante (3,5% da massa do cimento);

$\operatorname{erf}$  – função do erro de Gauss;

$x$  – espessura do cobrimento, admitida constante (2,5 cm);

$D_a$  – coeficiente aparente de difusão ( $\text{cm}^2/\text{ano}$ );

$t$  – tempo considerado (ano).

Uma adaptação, da equação 4.7 foi feita por SHA'AT et al. (1994), e é apresentada na equação 4.8. O autor propõe utilizar os valores da concentração de cloretos no tempo, que neste trabalho foram obtidos pelo ensaio de migração de cloretos, para encontrar valores comparáveis aos do coeficiente aparente de difusão de cloretos. De posse destes valores, os mesmos poderão ser utilizados na equação 4.7 para previsão da vida útil das estruturas. Cabe ressaltar que esta adaptação foi pouco testada e, portanto, seus resultados não devem ser encarados de uma forma absoluta.

$$\frac{c_t}{c_0} = \operatorname{erfc}\left\{\frac{\left[L - \left(\frac{D \cdot z \cdot F \cdot \Delta\phi \cdot t}{R \cdot T \cdot L}\right)\right]}{2\sqrt{D \cdot t}}\right\} \quad (4.8)$$

Onde:

$c_t$  – Concentração dos cloretos na superfície do concreto;

$c_0$  – concentração inicial dos cloretos no concreto, admitida constante (0,5M);

$\operatorname{erfc}$  – função erro de Gauss;

$L$  – espessura do corpo-de-prova (2,5 cm);

$D$  – coeficiente de difusão ( $\text{cm}^2/\text{ano}$ );

- z – carga elétrica (para cloretos igual a 1);  
 F – constante de Faraday (23063 cal/volt/eq);  
 $\Delta\phi$  - diferença de potencial aplicada (12 volt);  
 R – constante do gás (1,9872 cal/mol/Kelvin);  
 T – temperatura (Kelvin);  
 t – tempo (ano).

Com a equação 4.8, calculou-se, através do programa mathcad, o valor do coeficiente aparente de difusão de cloretos, em estado não estacionário. Para isso utilizou-se o gráfico de concentração de cloretos *versus* tempo, obtido no ensaio de migração de cloretos, proposto por ANDRADE (1993). Após isto e de posse dos parâmetros necessários, utilizou-se a segunda lei de Fick (equação 4.7) para mensurar o tempo (t) que os agentes agressivos alcançarão a armadura e o tempo necessário para que a concentração de cloretos alcance seu valor limite para o início da corrosão. Para tanto, decidiu-se utilizar os concretos identificados na Tabela 12.

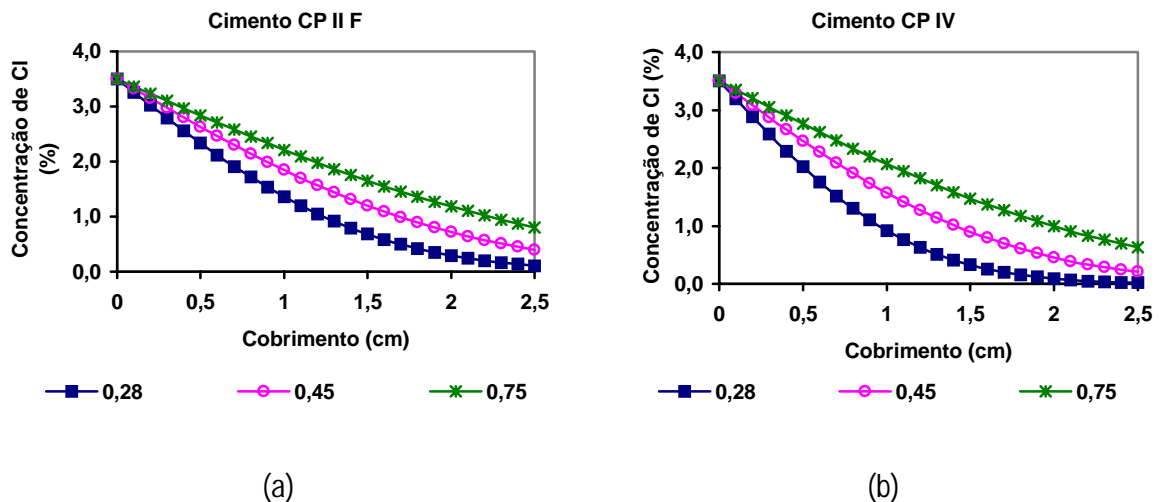
**Tabela 12** Características dos concretos utilizados para modelagem da vida útil

Relação água/cimento	Idade (dias)	Temperatura de cura (°C)	Tipo de Cimento
0,28	28	25	CP II F
0,45			
0,75			
0,45	28	5	
		25	
		40	
0,28	28	25	CP IV
0,45			
0,75			
0,45	28	5	
		25	
		40	

Cabe frisar que os resultados obtidos, a partir desta modelagem, fornecem somente uma idéia geral da tendência de comportamento do material, pois a estimativa da vida útil de uma estrutura de concreto é uma área emergente que ainda precisa de muitos desenvolvimentos, necessitando de modelos mais completos e rigorosos, que permitam quantificá-la. Portanto, mais estudos devem ser conduzidos para a verificação da aplicabilidade do modelo parcial aqui escolhido.

#### 4.6.2 Resultados

Na Figura 40 pode-se visualizar os perfis de penetração de cloretos para o interior dos concretos produzidos com cimento CP II F e CP IV. Os mesmos foram modelados pela segunda lei de Fick, para um período de exposição de 10 anos, temperatura de cura de 25°C e relações água/cimento variando de 0,28 a 0,75.

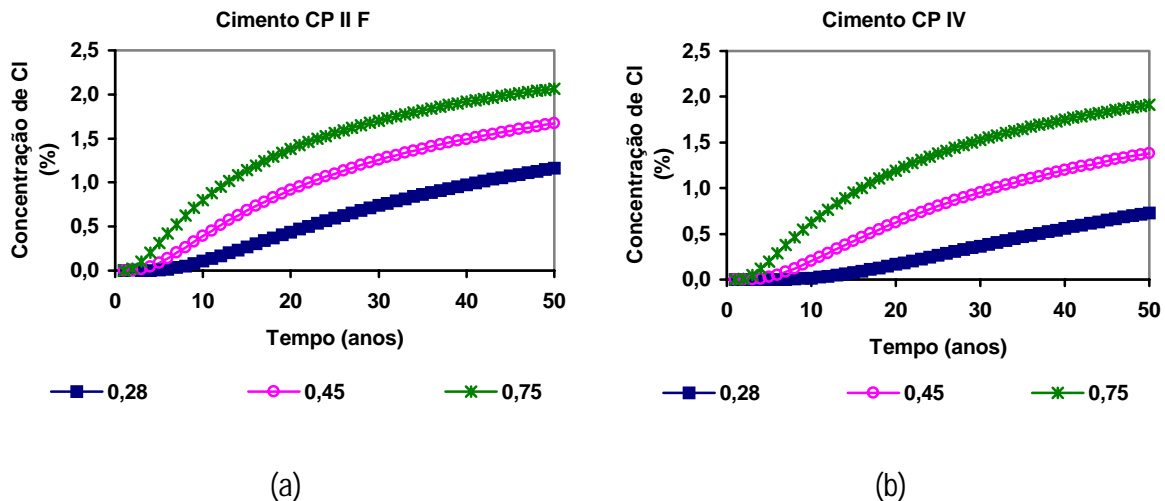


**Figura 40** Evolução da concentração de cloretos com a espessura do cobrimento, nos concretos produzidos com relações água/cimento de 0,28, 0,45 e 0,75 e cimento a) CP II F e b) CP IV

Percebe-se, pela análise da Figura 40, que a concentração de cloretos é maior para a relação água/cimento de 0,75 e que, à medida que o cobrimento aumenta, a concentração de cloretos diminui. Isto indica que a espessura do cobrimento e a relação água/cimento são de fundamental importância para as estruturas de concreto armado, por proteger a armadura e densificar a matriz do concreto, evitando assim que agentes agressivos alcancem a armadura ou mesmo penetrem no concreto.

Nota-se também, no gráfico, que, para um cobrimento constante de 2 cm e uma relação água/cimento fixa em 0,45, a concentração de cloretos, em relação a massa de cimento, presente neste concreto, confeccionados com o cimento CP II F, é de 0,7%. Enquanto que, para os mesmos parâmetros, os concretos produzidos com o cimento CP IV possuem uma concentração de cloretos de 0,4%. Verificando-se assim que há uma redução na concentração de cloretos de 43%, só com a mudança do tipo de cimento utilizados na produção do concreto.

Na Figura 41 observa-se os perfis de penetração de cloretos, modelados pela segunda lei de Fick, dos concretos produzidos com cimento CP II F e CP IV, no decorrer do tempo, com um cobrimento fixo de 2,5 cm e relações água/cimento de 0,28, 0,45 e 0,75.



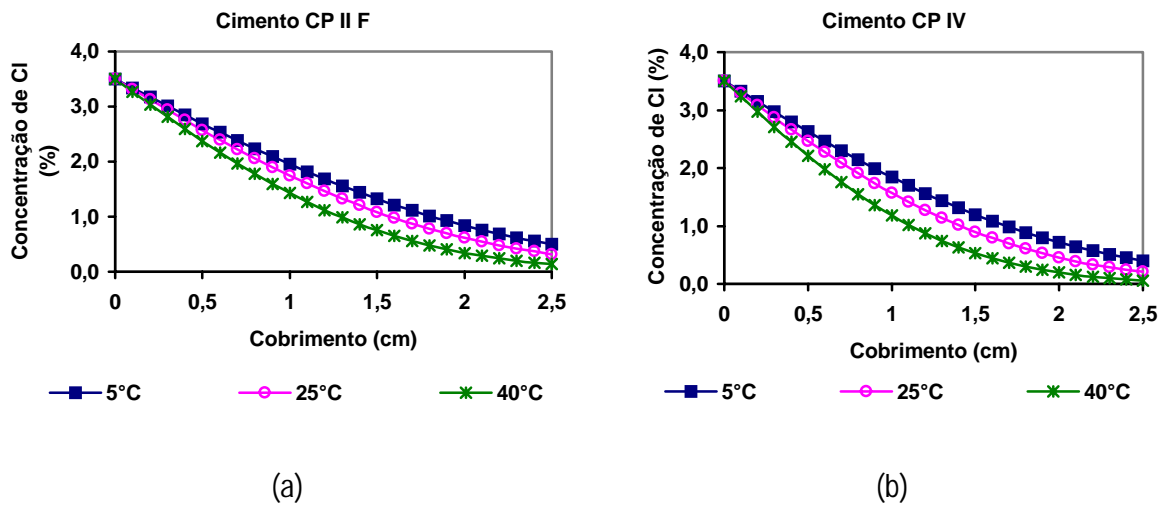
**Figura 41** Evolução da concentração de cloretos com o tempo, nos concretos produzidos com relações água/cimento de 0,28, 0,45 e 0,75 e cimento a) CP II F e b) CP IV

De uma forma geral, verifica-se, na Figura 41, que os concretos produzidos com relações água/cimento maiores apresentariam uma vida útil menor que os concretos confeccionados com relações água/cimento mais baixas, qualquer que fosse o valor do teor crítico de cloretos e independente do tipo de cimento. Com o aumento da relação água/cimento verificou-se, um teor mais alto de cloretos nos concretos, o que poderá ocasionar uma menor vida útil das estruturas, por estes apresentarem provavelmente uma estrutura mais porosa, com poros bem conectados.

Com relação ao tipo de cimento, comparando a Figura 40 com a Figura 41, pode-se perceber que os concretos confeccionados com o cimento CP IV apresentaram valores inferiores de concentração de cloretos, para um mesmo cobrimento e para um mesmo tempo de exposição, que os concretos produzidos com o cimento CP II F. Ratificando que os concretos produzidos com o cimento CP IV apresentam uma durabilidade maior frente à penetração de cloretos, provavelmente devido ao efeito benéfico da adição de cinza volante. Utilizando como exemplo, pode-se fixar a concentração de cloretos, em relação a massa de cimento, em 0,4% e a relação água/cimento em 0,45. Com isto observa-se que, os concretos produzidos com o cimento CP II F, para estas condições, apresentariam uma vida útil de 10 anos. Já os concretos confeccionados com o cimento CP IV, apresentariam uma vida útil de 15 anos, ou seja, os concretos produzidos com o cimento CP IV teriam um ganho de 50% de tempo, em relação aos concretos confeccionados com o cimento CP II F, até que os cloretos chegassem a alcançar a armadura.

Verifica-se, na Figura 42, os perfis de penetração de cloretos para o interior dos concretos produzidos com relação água/cimento de 0,45 e cimento CP II F e CP IV. Os mesmos tiveram seus

comportamentos modelados pela segunda lei de Fick, para um período de exposição de 10 anos e temperaturas de 5, 25 e 40°C.

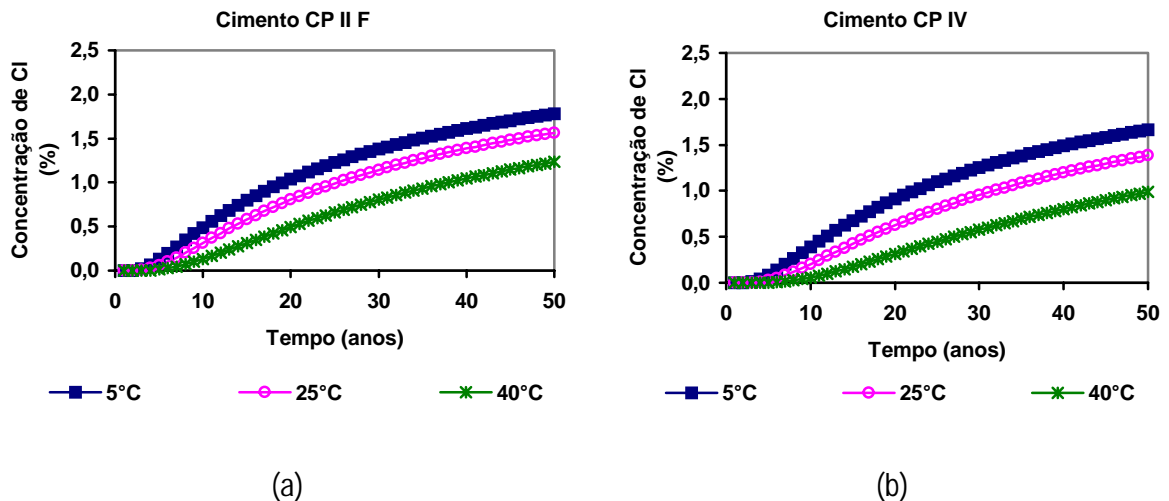


**Figura 42** Evolução da concentração de cloretos com a espessura do cobrimento, nos concretos expostos a temperaturas de 5, 25 e 40°C e produzidos com cimento a) CP II F e b) CP IV

Observa-se na Figura 42 que os concretos expostos a temperaturas de cura mais baixas apresentaram uma concentração de cloretos maiores, para um mesmo valor de cobrimento e que à medida que este aumenta o teor de cloretos diminui, para qualquer temperatura.

Verifica-se também que, para uma temperatura de cura constante de 25°C e um cobrimento fixo de 2 cm, a concentração de cloretos, em relação a massa de cimento, para os concretos confeccionados com o cimento CP II F, é de 0,6%. Já para os concretos produzidos com o cimento CP IV, esta concentração de cloretos é de 0,4%. Portanto, ocorre uma redução de 33%, no valor da concentração de cloretos, nos concretos apenas com a mudança do tipo de cimento.

Na Figura 43 apresenta-se os perfis de penetração de cloretos, modelados pela segunda lei de Fick, dos concretos produzidos com relação água/cimento de 0,45 e cimento CP II F e CP IV, no decorrer do tempo, com um cobrimento fixo de 2,5 cm e temperaturas variando de 5 a 40°C.



**Figura 43** Evolução da concentração de cloretos no tempo, nos concretos expostos a temperaturas de 5, 25 e 40°C e produzidos com cimento a) CP II F e b) CP IV

Constata-se, na Figura 43, que a concentração de cloretos eleva-se com o decorrer do tempo e que os concretos expostos a temperaturas mais baixas provavelmente apresentarão vidas úteis menores que os submetidos a temperaturas de curas mais altas, pois apresentarão uma concentração de cloretos maiores em menor tempo.

Pode-se perceber, na Figura 42 e na Figura 43, que os concretos confeccionados com o cimento CP IV, independente da temperatura de exposição, obtiveram valores de concentração de cloretos inferiores aos com cimento CP II F, tanto em relação ao cobrimento como com o decorrer do tempo.

Observa-se também, através do gráfico, que para uma temperatura de cura constante de 25°C e uma concentração de cloretos, em relação a massa do cimento, fixa em 0,4%, os concretos confeccionados com o cimento CP II F apresentariam uma vida útil de 11 anos. Já os concretos produzidos com o cimento CP IV, essa vida útil seria de 15 anos, ou seja, ocorre um aumento no tempo, em que os cloretos levarão para alcançar a armadura dos concretos, de 36% quando comparado com os concretos confeccionados com o cimento CP II F.

Cabe ressaltar que o comportamento dos concretos confeccionados com o cimento CP II F e CP IV foram parecidos, provavelmente por terem sido parametrizados para uma mesma relação água/cimento e não comparados pelos seus níveis de resistência, como usualmente acontece na prática. De acordo com o item 4.3, a resistência dos concretos produzidos com o cimento CP II F foram superiores aos dos concretos confeccionados com o cimento CP IV, inferindo que para uma mesma resistência e com relação a durabilidade, os concretos produzidos com o cimento CP II F, teriam um comportamento bem pior do que o constatado, pela comparação da relação água/cimento. Além disso,

para efeito de dosagem é muito mais prático controlar a relação água/cimento, do que se produzir concretos com mesmas resistências. Portanto, quando utiliza-se tipos de cimentos diferentes pode-se obter concretos com relações água/cimento mais baixas ou mais elevadas para uma mesma resistência.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

De acordo com a revisão bibliográfica, a penetração de cloretos nos concretos é susceptível aos mais variados fatores, tantos aos relacionados com o ambiente quanto com a grande variabilidade existente nas características dos concretos.

O coeficiente de difusão de cloretos é um dos principais fatores controladores do tempo necessário para que uma concentração suficiente de íons cloretos alcance a armadura e despassive a mesma. Portanto, qualquer fator que produz a redução no coeficiente de difusão de cloretos poderá prolongar a vida útil das estruturas, devido ao aumento no tempo de iniciação da corrosão das armaduras de concreto.

Embora o objetivo principal seja a avaliação do coeficiente de difusão de cloretos de concretos confeccionados com diferentes tipos de cimento, relações água/cimento, tempo e temperatura de cura, analisou-se também neste trabalho a influência destes fatores controláveis na penetração acelerada de cloretos e resistência à compressão dos concretos produzidos. A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados neste trabalho, pode-se enumerar algumas conclusões, todas comprovadas estatisticamente. Entretanto, as conclusões que se seguem não devem ser tomadas de maneira absoluta, pois referem-se somente aos dados obtidos dos concretos investigados nesse trabalho.

- A partir da análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios foi possível determinar os modelos matemáticos ajustados para as propriedades estudadas. Os modelos estão descritos a seguir:

Para coeficiente efetivo de difusão de cloretos (em  $\cdot 10^{-9}$  cm<sup>2</sup>/s)

$$C_{cl} = 3,95998 + 1,68574 * ac - 0,697335 * Idade - 0,9577 * Temp - 0,777977 * TCP$$

$$r^2 = 0,825$$

Para penetração acelerada de cloretos (em Coulombs):

$$Q = 4817,01 + 3979,56 * a / c - 2300,72 * Idade - 3236,73 * Temp - 847,053 * TCP * Idade - 1501,77 * TCP * Temp$$

$$r^2 = 0,761$$

Para resistência à compressão (em MPa):

$$f_c = 33,9939 - 24,6967 * a / c + 7,72409 * Idade + 3,59965 * Temp - 7,05202 * a / c * Temp + 11,0997 * a / c^2 - 5,27383 * Idade^2 - 1,37023 * TCP$$

$$r^2 = 0,961$$

Todos os modelos foram obtidos através da análise de regressão múltipla ponderada dos resultados de cada ensaio, considerando os níveis codificados de cada variável utilizada que estão apresentados na Tabela 11.

- A diminuição da relação água/cimento dos concretos possibilita obter valores menores de coeficiente de difusão de cloretos nos concretos estudados, para os dois tipos de cimento testados.
- Constatou-se também que a idade de cura tem influência no coeficiente de difusão de cloretos, pois verificou-se que, com o decorrer do tempo, o mesmo diminui.
- Com relação ao coeficiente efetivo de difusão de cloretos, pode-se perceber que o mesmo aumentou com a diminuição da temperatura de cura dos concretos.
- A utilização de cimento CP IV possibilitou a obtenção de concretos com coeficientes de difusão de cloretos significativamente inferior aos com cimento CP II F.
- Não foi constatado ser significativo o efeito isolado do tipo de cimento, no ensaio de penetração acelerada de cloretos, provavelmente devido aos efeitos da relação água/cimento e da temperatura de cura serem bem mais elevados que o do tipo de cimento. Porém, os efeitos da interação do tipo de cimento com a idade e com a temperatura de cura foram constatados.
- A penetração acelerada de cloretos aumenta com o incremento da relação água/cimento.
- De uma forma geral, quanto maior a idade de cura menor a carga total passante. Entretanto, para os concretos confeccionados com o cimento CP II F a carga passante é menor, nas primeiras idades, e maior nas idades mais avançadas (aproximadamente a partir dos 50 dias), que a dos concretos produzidos com o cimento CP IV.

- Um incremento na temperatura de cura dos concretos, até 40°C, mostrou-se ser favoravelmente significativo para a penetração acelerada de cloretos. Podendo-se perceber também que, para temperaturas de cura abaixo de aproximadamente 22°C, os concretos produzidos com o cimento CP II F apresentaram menor valor de carga total passante que os concretos confeccionados com cimento CP IV. E que comportamento inverso ocorreu quando as temperaturas de cura foram maiores que aproximadamente 22°C, onde o valor da carga total passante foi maior para os concretos produzidos com CP II F e menor para os concretos confeccionados com o cimento CP IV.
- A temperatura de cura tem importantes implicações para as estruturas de concreto. Os concretos expostos a temperaturas de cura mais altas apresentaram resistências à compressão mais elevadas.
- Os concretos confeccionados com o cimento CP II F apresentaram maiores resistências que os concretos produzidos com o cimento CP IV, para todas as variáveis independentes estudadas.
- A resistência à compressão não é um parâmetro adequado para estimar a durabilidade de concretos confeccionados com diferentes tipos de cimento frente ao fenômeno de penetração de íons cloreto. Pois, para um mesmo patamar de resistência à compressão, concretos com diferentes constituições podem ter valores de coeficientes de difusão de cloretos diferentes. Contudo, de uma forma geral, quanto maior a resistência à compressão, para um mesmo tipo de cimento, menor a carga total passante, ou seja, maior a resistência à penetração de cloretos.
- Pode-se perceber que o ensaio de migração de cloretos, proposto por ANDRADE (1993), apresenta resultados mais confiáveis e, ainda, os dados obtidos durante o ensaio podem ser utilizados em modelos matemáticos para previsão de vida útil de estruturas de concreto armado.
- Foi constatado também, ao relacionar o ensaio normatizado da ASTM C 1202/92 com o proposto por ANDRADE (1993), que existe uma boa correlação entre os mesmos, ou seja, quando se deseja medir a penetração de cloretos e não se tem o tempo necessário, o ensaio da ASTM C 1202/92 pode ser utilizado, porém seus resultados devem ser encarados com reservas.

- Com relação à previsão de vida útil, constatou-se que os concretos com relações água/cimento menores, expostos a temperaturas mais altas, com uma espessura de cobrimento maior e confeccionados com o cimento CP IV obtiveram um desempenho melhor, apresentando uma menor concentração de cloretos, para qualquer valor crítico deste, e, conseqüentemente, maiores valores de vida útil.

## 5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Em vista da pequena quantidade de trabalhos realizados sobre a medição do coeficiente de difusão de cloretos no Brasil, muitas sugestões para novas pesquisas poderiam ser listadas. Entretanto, foram selecionadas a seguir apenas algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros:

- manter a temperatura ambiente constante durante a realização do ensaio de migração;
- estender o presente estudo para outros tipos de cimentos;
- analisar a influência de diferentes tipos de cura no coeficiente de difusão de cloretos;
- verificar o comportamento do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário;
- avaliar a maturidade dos concretos produzidos neste trabalho;
- estudar detalhadamente a microestrutura dos concretos expostos a diferentes temperaturas de cura.

## 6 BIBLIOGRAFIA

ACI 201.2R-77 – Guide to Durable Concrete, Detroit-USA, ACI Manual of Concrete Practice, 1991, Part 1, págs.201.2R-1 – 201.2R-37.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. Valores críticos de cloruros para despassivar aceros de refuerzo embebidos en un mortero estandarizado de cemento Portland. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1997, p.555-562.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration:** ASTM C 1202. Philadelphia, 1992.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v.23, n.3, p.724-742, 1993.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo: PINI, 1992. 104p.

ANDRADE, C. Ultimos avances en el calculo de la vida util del hormigon estructural. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., 2000, Punta del Este, Uruguai. **Memórias...**[CD-ROM]. Punta del Este: EDITOR, 2000(a), 31p.

ANDRADE, J.J.O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no Estado de Pernambuco.** Porto Alegre, 1997. 148p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANDRADE, J.J.O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos.** Porto Alegre, 2000(b). 112 p. Relatório de qualificação (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ARANHA, P.M.S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica.** Porto Alegre, 1994. 144p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ARYA, C., XU, Y. Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.4, p.893-902, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo:** NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – determinação da composição granulométrica:** NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman:** NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone:** NBR 7223. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos**: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**: NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto armado**: NBR 6118. Rio de Janeiro, 1978.

BARATA, M.S. **Concreto de alto desempenho no Estado do Pará: estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim**. Porto Alegre, 1998. 153p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade do Rio Grande do Sul.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. São Paulo, 1995. 236p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

BUENFELD, N.R.; EL-BELBOL, S. Discussion on paper: rapid estimation of chloride diffusion coefficient in concrete by Dhir et al. **Magazine of Concrete Research**, n.155, p.135-139, 1991.

CABRAL, A.E.B. **Avaliação de sistemas de reparo utilizados em estruturas atacadas por cloretos, através da resistência de polarização**. Porto Alegre, 2000. 161p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CABRERA, J.G.; CLAISSE, P.A. Measurement of chloride penetration into silica fume concrete. **Cement & Concrete Composites**, v.12, p.157-161, 1990.

CALÇADA, L.M.L. **Estudo da eficácia do ensaio de migração de cloretos na previsão da durabilidade dos concretos**. Florianópolis, 2000. 84p Exame de qualificação (doutorado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras de concreto**. São Paulo: PINI, 1997.

CIB W 80/RILEM 71-PSL. (Conseil International du Batment Pour la Recherche Létude et la Documentation & Réunion Internationale des Laboratories D'essais et de Recherches sur Matériaux et les Constructions). **Prediction of service life of building materials and components**. Rotterdam, 1983, 98p.

COUTINHO, A.S., GONÇALVES, A. **Fabrico e propriedades do betão**. 2.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994. 3v. v3. 368p.

DAL MOLIN, D.C.C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1988. 196p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DELAGRAVE, A.; MARCHAND, J.; SAMSON, E. Prediction of diffusion coefficients in cement-based materials on the basis of migration experiments. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.12, p.1831-1842, 1996.

DETWILER, R.J.; KJELSEN, K.O.; GJØRV, O.E. Resistance to chloride intrusion of concrete cured at different temperatures. **ACI Materials Journal**, v.88, n.1, p.19-24, 1991.

DETWILER, R.J.; WHITING, D.A.; LAGERGREN, E.S. Statistical approach to ingress of chloride ions in silica fume concrete for bridge decks. **ACI Materials Journal**, v.96, n.6, p.670-675, 1999.

DHIR, R.K.; JONES, M.R.; AHMED, H.E.H.; SENEVIRATNE, A.M.G. Rapid estimation of chloride diffusion coefficient in concrete. **Magazine of Concrete Research**, v.42, n.152, p.177-185, 1990.

DHIR, R.K.; JONES, M.R.; ELGHALY, A.E. PFA Concrete: exposure temperature effects on chloride diffusion. **Cement and Concrete Research**, v.23, n.5, p.1105-1114, 1993.

DHIR, R.K.; JONES, M.R.; NG, S.L.D. Prediction of total chloride content profile and concentration/time-dependent diffusion coefficients for concrete. **Cement and Concrete Research**, v.50, n.1, p.37-48, 1998.

EPERJESI, L. et al. Diffusion de cloruros en hormigones con adiciones minerales activas. In: CONGRESSO INTERNATIONAL DE TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN, 1., 1998, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires, 1998. p.491-499.

FERREIRA, A.A. **Concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. Porto Alegre, 1999. 132p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FIB BULLETINS. Structural Concrete – The textbook on behaviour, desing and performance. Updated Knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990, v.1, 1999.

FIGUEIREDO, E.J.P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para a proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas: contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado**. São Paulo, 1994. 423p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FIGUEIREDO, E.J.P. et al. **Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto**. Boletim Técnico da EPUSP, BT/PCC/121, 1993.

FRANCINETE JR., P.; CASCUDO, O. Propriedades ligadas à durabilidade do concreto e suas relações com a resistência à compressão. In: SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa. **Proceedings...** João Pessoa, 2000. p.744-757.

FRANCINETE JR., P.; FIGUEIREDO, E.J.P. **Estudo da difusão do oxigênio no concreto**. Boletim Técnico da EPUSP, BT/PCC/238, 1999.

GASTALDINI, A.L.G.; ISAIA, G.C. Efeitos de misturas compostas de pozolonas e escória na permeabilidade a cloreto. In: ENCONTRO NACIONAL EM TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2000, Salvador. **Anais...** Salvador: UFBA, UEFS, ENEB, UPE, UNIFOR, 2000. 2v. v.2, p.1026-1033.

GEIKER, M. et al. **Laboratory Test Methods**. Performance Criteria for Concrete Durability, RILEM Report 12, 1995, p.235-252.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GJØRV, O.E.; TAN, K.; KHANG, M.H. Diffusivity of chlorides from seawater into high-strength lightweight concrete. **ACI Materials Journal**, v.89, n.1, p.3-12, 1994.

GJØRV, O.; SAKAI, K. Testing of chloride diffusivity for concrete. In: CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS, 1995, Sapporo. **Proceedings...** London: eds K.SAKAI, N.BANTHIA, and O.E.GJØRV, E & FN SPON, 1995, 2v. v.1, p.655-666.

GONZÁLEZ, J.A.; FELIÚ, S.; RODRÍGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part I: when, how and how much steel corrodes. **Materials and Structures**, v.29, p.40-46, 1996.

GONZÁLEZ, J.A.; OTERO, E.; FELIÚ, S.; LÓPEZ, W. Initial steps of corrosion in the steel/Ca(OH)<sub>2</sub> + Cl<sup>-</sup> system: the role of heterogeneities on the steel surface and oxygen supply. **Cement and Concrete Research**, v.23, n.1, p.33-40, 1993.

GOWRIPALAN, N. et al. Effect of curing on durability. **Concrete International**, v.12, n.2, p.47-54, 1990.

GU, P. et al. Corrosion resistance of stainless steel in chloride contaminated concrete. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.8, p.1151-1156, 1996.

GU, P. et al. Performance of steel reinforcement in portland cement and high-volume fly ash concretes exposed to chloride. **ACI Materials Journal**, v.96, n.6, p.551-558, 1999.

GUIMARÃES, E.A. **Avaliação da capacidade protetora da resina de óleo de mamona contra a penetração de agentes agressivos no concreto**. Brasília, 1997. 150p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

HAQUE, M.N.; KAYYALI, O.N. Aspects of chloride ion determination in concrete. **ACI Materials Journal**, v.92, n.5, p.532-541, 1995.

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. São Paulo, 1993. 231p. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HELENE, P.R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI, 1986.

HELENE, P.R.L. Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto. In: WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 1997, São Leopoldo. **Anais...** São Leopoldo, 1997. p.31-42.

HELENE, P.R.L., TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

HO, D.W.S.; LEWIS, R.K. The water sorptivity of concrete: the influence of constituents under continuous curing. In: DURABILITY OF BUILDING MATERIALS, 1987, Amsterdam. **Proceedings...** Amsterdam, 1987. v.4, p.241-252.

HOFFMANN, A.T. **Determinação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. Porto Alegre, 2001. 150p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



HUSSAIN, S.E.; AL-GAHTANI, A.S. RASHEEDUZZAFAR. Chloride threshold for corrosion of reinforcement in concrete. **ACI Materials Journal**, v.94, n.6, p.534-538, 1996.

HUSSAIN, S.E.; RASHEEDUZZAFAR. Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete. **ACI Materials Journal**, p.264-272, 1994.

HUSSAIN, S.E.; RASHEEDUZZAFAR. Effect of temperature on pore solution composition in plain concrete. **Cement and Concrete Research**, v.23, n.6, p.1357-1368, 1993.

HUSSAIN, S.E.; RASHEEDUZZAFAR; AL-GAHTANI, A.S. Influence of sulfates on chloride binding in cements. **Cement and Concrete Research**, v.24, p.8-24, 1994.

IRASSAR, E.F.; BONAVETTI, V.; DONZA, H; CABRERA, O. Mechanical properties and durability of concrete made with portland limestone cement. In: SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa. **Proceedings...** João Pessoa, 2000. p.200-216.

IRASSAR, E.F.; BONAVETTI, V.; TREZZA, M.; DONZA, H. Difusión de cloruros en hormigones conteniendo cementos com filler calcáreo. In: CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD, 7., 1999, Montevideo. **Anais...** Montevideo, 1999. 2v. v.1, p.297-304.

ISAIA, G.C, HELENE, P.R.L. Durabilidade de concreto de elevado desempenho com pozolanas. In: WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 1993, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1993. p.13-33.

ISAIA, G.C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** São Paulo, 1995. 280p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ISAIA, G.C. Validade do ensaio de penetração de cloretos (ASTM C 1202) para avaliação da durabilidade de concreto de elevado desempenho com pozolanas. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Proceedings...** Florianópolis: 1996. p.554-565.

JENSEN, O.M. et al. Chloride ingress in cement paste and mortar. **Cement and Concrete Research**, v.29, p.1497-1504, 1999.

JONES, M.R.; DHIR, R.K.; GILL, J.P. Concrete surface treatment: effect of exposure temperature on chloride diffusion resistance. . **Cement and Concrete Research**, v.25, n.1, p.197-208, 1991.

KROPP, J. **Chlorides in concrete.** Performance Criteria for Concrete Durability, RILEM REPORT 12, Editor: J. Kropp e K. Hilsdorf, p.138-164, 1995.

KULAKOWSKI, M.P. **Argamassa com Adição de Microsilica para Reparos Estruturais: Estudo da Penetração de Cloretos.** Porto Alegre, 1994. 131p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LI, Z.; PENG, J.; MA, B. Investigation of chloride diffusion for high-performance concrete containing fly ash, microsilica and chemical admixtures. **ACI Materials Journal**, v.96, n.3, p.391-396, 1999.

LIBÓRIO, J.B.L. **Estudo patológico das construções de argamassa armada existentes no Brasil**. São Carlos, 1990. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LIMA, M.G. **Influência dos componentes do concreto na corrosão das armaduras**. Porto Alegre, 1990. 133p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LIU, Y. **Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures**. Blacksburg, 1996. PhD Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University.

LOPES, A.N.M. **Avaliação Comparativa de Concretos com e sem Sílica Ativa para Resistências entre 50 e 60 MPa**. Brasília, 1999. 170p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

MACDONALD, K.A.; NORTHWOOD, D.O. Experimental measurements of chloride ion diffusion rates using a two-compartment diffusion cell: effects of material and test variables. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.7, p.1407-1416, 1995.

MACKECHNIE, J.R.; ALEXANDER, M.G. Rapid chloride test comparisons. **Concrete International**, p.40-45, 2000.

MALHOTRA, V.M.; CARETTE, G.G.; SIVASUNDARAM, V. Role of silica fume in concrete: a review. In: **ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY**, 1994, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: CANMET, 1994. 2ed, p. 915-990.

MANGAT, P.S. MOLLOY, B.T. Prediction of free chloride concentration in concrete using routine inspection data. **Magazine of Concrete Research**, v.46, n.169, p.279-287, 1994.

MEDEIROS, M.H.F., MONTEIRO, E., BARKOKÉBAS JR, B. A Corrosão de Armaduras Sob a Ação de Íons Cloreto em Relação a Capacidade de Proteção de Alguns Tipos de Cimentos Nacionais com Adições Pozolânicas. In: **CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD**, 7., 1999, Montevideo. **Anais...** Montevideo, 1999. 2v. v.1, p.500-506.

MEHTA, P.K. Durability of concrete – Fifty Years of progress? In: **SEMINÁRIO DE QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO**, 1993, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1993. p.1-31.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

MONTEIRO, E., et al. Estudo da influência do tipo de cimento em relação a frente de penetração dos íons cloretos. In: **CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD**, 7., 1999, Montevideo. **Anais...** Montevideo, 1999. 2v. v.1, p.297-304.

MONTEIRO, E.C.B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloretos**. Brasília, 1996. 138p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília.

MORAES, R.C.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. Efeitos da cinza volante, cinza de casca de arroz e fíler calcário sobre a resistência mecânica do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42., 2000, Fortaleza. **Anais...** [CD-ROM]. Fortaleza: IBRACON, 2000.

NEPOMUCENO, A.A. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente a la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras, estudio mediante la tecnica de resistencia de polarizacion.** Madrid, 1992. 371p. Tesis (Doctoral) – Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politecnica de Madrid.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2.ed. São Paulo: PINI, 1997. 828p.

NGALA, V.T.; PAGE, C.L.; PARROTT, L.J.; YU, S.W. Diffusion in cementitious materials: II – Further investigations of chloride and oxygen diffusion in well-cured OPC and OPC/30%PFA pastes. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.4, p.819-826, 1995.

NINCE, A.A. **Levantamento de dados sobre a deterioração de estruturas na região centro-oeste.** Brasília, 1996. 176p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília.

OLLIVIER, J.P. **Durability of concrete.** Boletim Técnico da EPUSP, BT/PCC/192, 1998.

PAGE, C.L., LAMBERT, P., VASSIE, P.R.W. Investigations of reinforcement corrosion.1. The pore electrolyte phase in chloride-contaminated concrete. **Materials and Structures**, v.24, p.243-252, 1991(a).

PAGE, C.L., LAMBERT, P., VASSIE, P.R.W. Investigations of reinforcement corrosion.2. Electrochemical monitoring of steel in chloride-contaminated concrete. **Materials and Structures**, v.24, p.351-358, 1991(b).

PAGE, C.L., SHORT, N.R.; EL TARRAS, A. Diffusion of chlorides ions in hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v.11, p.395-406, 1981.

PERRATON, D.; AICTIN, P.C.; CHARLES-GIBERGUES. Permeability, as seen by the researcher. In: HIGH PERFORMANCE CONCRETE FROM MATERIAL TO STRUCTURE, 1992, London. **Proceedings...** London: E&F Spon, 1992. p.252-277.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de cimento Portland.** 11 ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987. 307p.

PETTERSSON, K.H. Factors influencing chloride-induced corrosion of reinforcement in concrete. In: DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 7, 1996, London. **Anais...** London, 1996. v.1, p.33-341.

PLANTE, P.; BILODEAU, A. Rapid chloride ion permeability test: data on concretes incorporating supplementary cementing materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLLANS IN CONCRETE, 3., 1989, Trondheim. **Proceedings...** Trondheim, 1989. v.1, p. 625-644 (ACI SP 144-30).

PLATEL, H.H.; BLAND, C.H.; POOLE, A.B. The microstructure of concrete cured at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.3, p.485-490, 1995.

POULSEN, E. Estimation of chloride ingress into concrete and prediction of service lifetime with reference to marine RC structures. In: DURABILITY OF CONCRETE IN SALINE ENVIRONMENT, 1996, London. **Proceedings...** London, 1996. p.113-126.

PREZZI, M., et al. Reliability approach to service life prediction of concrete exposed to marine environments. **ACI Materials Journal**, v.93, n.6, 1996.

RAHHAL, V.; IRASSAR, E.F.; GONZÁLEZ, M.; BONAVETTI, V. Difusión de iones cloruro en hormigones con filler calcáreo. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN, 1., 1998, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires, 1998.

RANC, R. et al. Durability of cements with fillers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE, 2., 1991, Montreal. **Proceedings...** Montreal, 1991. v.2., p.1239-1257 (ACI-SP-126-66).

RASHEEDUZZAFAR. Influence of cement composition on concrete durability. **ACI Materials Journal**, v.89, n.6, p.574-586, 1992.

REGATTIERI, C.E.X.; SILVA, M.G.; HELENE, P.R.L.; AGOPYAN, V.; ABREU, J.V. Influência do tipo de cimento na resistência, na absorção capilar e na difusão de cloretos dos concretos plásticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4., 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1996.

REPETTE, W.L. **Modelo de previsão de vida útil de revestimento de proteção da superfície do concreto em meios de elevada agressividade**. São Paulo, 1997. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

RIBEIRO, J.L.D. **Projeto de experimentos na otimização de produtos e processos**. Porto Alegre, 1999 [Notas de aula].

RODOLPHO, P.M., ISA, M.M. A Influência da Resistência à Penetração de Cloretos e da Carbonatação na Durabilidade das Construções de Microconcreto. In: CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD, 7., 1999, Montevideo. **Anais...** Montevideo, 1999. 2v. v.1., p.313-320.

SABIR, B.B.; WILD, S. Temperature effects on the strength development in concrete containing fly ash – metakaolin blended cements. In: SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa. **Proceedings...** João Pessoa, 2000. p.744-757. p.165-175.

SATO, N.M.N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. São Paulo, 1998. 163p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SHA'AT, A.A-H; BASHEER, P.A.M.; LONG, A.E.; MONTGOMERY, F.R. Reliability of the accelerated chloride migration test as a measure of chloride diffusivity in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE HELD AT THE UNIVERSITY OF SHEFFIELD, 1994, Sheffield. **Proceedings...** Sheffield, 1994. v.1. p. 446-460.

SHI, C. et al. Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implication on the Rapid Chloride Permeability Test Results. **ACI Materials Journal**, v.95, n.4, 1998, p.389-394.

SILVA FILHO, L.C.P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica**. Porto Alegre, 1994. 143p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVA, P.F.A.; DJANIKIAN, J.G. Durabilidade do concreto aparente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 3., 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1993. p.393-406.

SILVA, T. J. **Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro**. Barcelona, 1998. Tesis (Doctoral). Universidad Politecnica de Catalunya.

SOUZA, V.C.M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

SWAMY, R.N. The myths and misconceptions of chloride penetration into concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 10., 1997. **Proceedings...** v.4, p.551-557.

SWAMY, R.N.; SURYAVANSHI, A.K.; TANIKAWA, S. Protective ability of an acrylic-based surface coating system against chloride and carbonation penetration into concrete. **ACI Materials Journal**, v.95, n.2, p. 101-112, 1998.

TANG, L.; NILSSON, L.O. A numerical method for prediction of chloride penetration into concrete structures. In: THE MODELLING OF MICROESTRUTURE AND IT'S POTENTIAL FOR STUDYING TRANSPORT PROPERTIES AND DURABILITY, 1994, France. **Proceedings...** France, 1994.

TANG, L.; NILSSON, L.O. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. **ACI Materials Journal**, v.89, n.1, p. 49-53, 1992.

TEIXEIRA, M.P. **Metodologias auxiliares para diagnóstico de patologias de corrosão em estruturas de concreto**. Brasília, 1998. 169p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

THOMPSON, N.G.; LAWSON, K.M.; BEAVERS, J.A. Monitoring cathodically protected steel in concrete structures with electrochemical impedance techniques. **Corrosion**. v.44, n.8, p.581-588, 1988.

TUMIDAJSKI, P.J.; CHAN, G.W.; FELDMAN R.F.; STRATHDEE, G. A Boltzmann-Matano analysis of chloride diffusion. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.7, p. 1556-1566, 1995.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982, 469p.

VILLARINO, B.L.; SEVILLA, J.B.; LUQUE, V.F.; GARCÍA, M.R.R. Concrete durability. Influence of chloride ions concentrations in mixing water and dissolution. **Materiales de Construcción**, v.45, n.237, p.37-52, 1995.

WAYERS, R.E. Service life model for concrete structures in chloride laden environments. **ACI Materials Journal**, v.95, n.4, p.445-453, 1998.

WEE, T.H. et al. Influence of aggregate fraction in the mix on the reliability of the rapid chloride permeability test. **Cement and Concrete Composites**, v.21, n.1, p.59-72, 1999.

WHITING, D. **Rapid measurement of the chloride permeability of concrete**. Public Roads, v.45, n.3, p. 101-112, 1981.

WINCK, M.L.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. Estudo comparativo entre adições calcárias e pozolânicas sobre a penetração de cloretos em concreto armado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: IBRACON, 2000.

ZHANG, M.H.; MALHOTRA, V.M. High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. **ACI Materials Journal**, v.93, n.6, p.629-636, 1996.

## ANEXOS

**ANEXO 1 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO AXIAL**



**Tabela 13** Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial

Tipo de Cimento	a/c	Idade (dias)	Temperatura (°C)	Resistência (MPa)
CP II F	0,28	28	25	66,80
				65,46
	0,35	14	15	49,17
				30
		63	15	60,31
				30
	0,45	7	25	27,51
				28,01
		28	5	35,62
				37,53
			25	39,79
				35,98
			40	41,27
				43,10
		91	25	45,43
				41,69
	0,60	14	15	18,13
				30
		63	15	27,86
				30
0,75	28	25	15,94	
			13,90	
CP IV	0,28	28	25	64,33
				61,16
	0,35	14	15	39,15
				30
		63	15	51,50
				30
	0,45	7	25	26,74
				25,61
		28	5	24,69
				25,54
			25	37,32
				33,15
			40	37,46
				41,41
		91	25	47,05
				43,52
	0,60	14	15	19,89
				30
		63	15	24,48
				30
0,75	28	25	12,42	
			13,69	

**ANEXO 2 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE PENETRAÇÃO ACELERADA  
DE CLORETOS**

**Tabela 14** Resultados dos ensaios de penetração acelerada de cloretos

Tipo de Cimento	a/c	Idade (dias)	Temperatura (°C)	Carga Passante (coulomb)
CP II F	0,28	28	25	1266,3
				1466,1
	0,35	14	15	2125,8
				1785,6
		63	15	1494,9
			30	930,6
	0,45	7	25	7493,4
				7636,0
		28	5	6767,1
				6519,9
			25	4033,9
				4224,7
		40	2059,9	
			2286,3	
	91	25	2262,5	
			2257,9	
	0,60	14	15	6246,9
			30	5238,8
		63	15	5414,4
			30	4476,6
0,75	28	25	8643,7	
			8848,4	
CP IV	0,28	28	25	680,4
				790,2
	0,35	14	15	1788,3
			30	380,7
		63	15	803,7
			30	98,1
	0,45	7	25	11185,2
				10942,4
		28	5	12771,9
				12618,1
			25	3879,6
				3783,9
		40	372,7	
			565,2	
	91	25	1134,0	
			1082,6	
	0,60	14	15	8775,0
			30	6560,2
		63	15	6616,0
			30	4807,1
0,75	28	25	9362,2	
			9508,7	

**Tabela 15** Temperatura máxima atingida durante a realização do ensaio da ASTM

Tipo de Cimento	a/c	Idade (dias)	Temperatura (°C)	Temperatura do ensaio (°C)
CP II F	0,28	28	25	40
				46
	0,35	14	15	32
				30
		63	15	30
				30
	0,45	7	25	72
				70
		28	5	70
				72
				40
			25	46
				40
				40
		91	25	42
				40
	0,60	14	15	63
				30
		63	15	60
				30
0,75	28	25	66	
			65	
CP IV	0,28	28	25	40
				46
	0,35	14	15	32
				30
		63	15	30
				30
	0,45	7	25	72
				70
		28	5	70
				72
				40
			25	46
				40
				40
		91	25	42
				40
	0,60	14	15	63
				30
		63	15	60
				30
0,75	28	25	66	
			65	

### **ANEXO 3 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS**

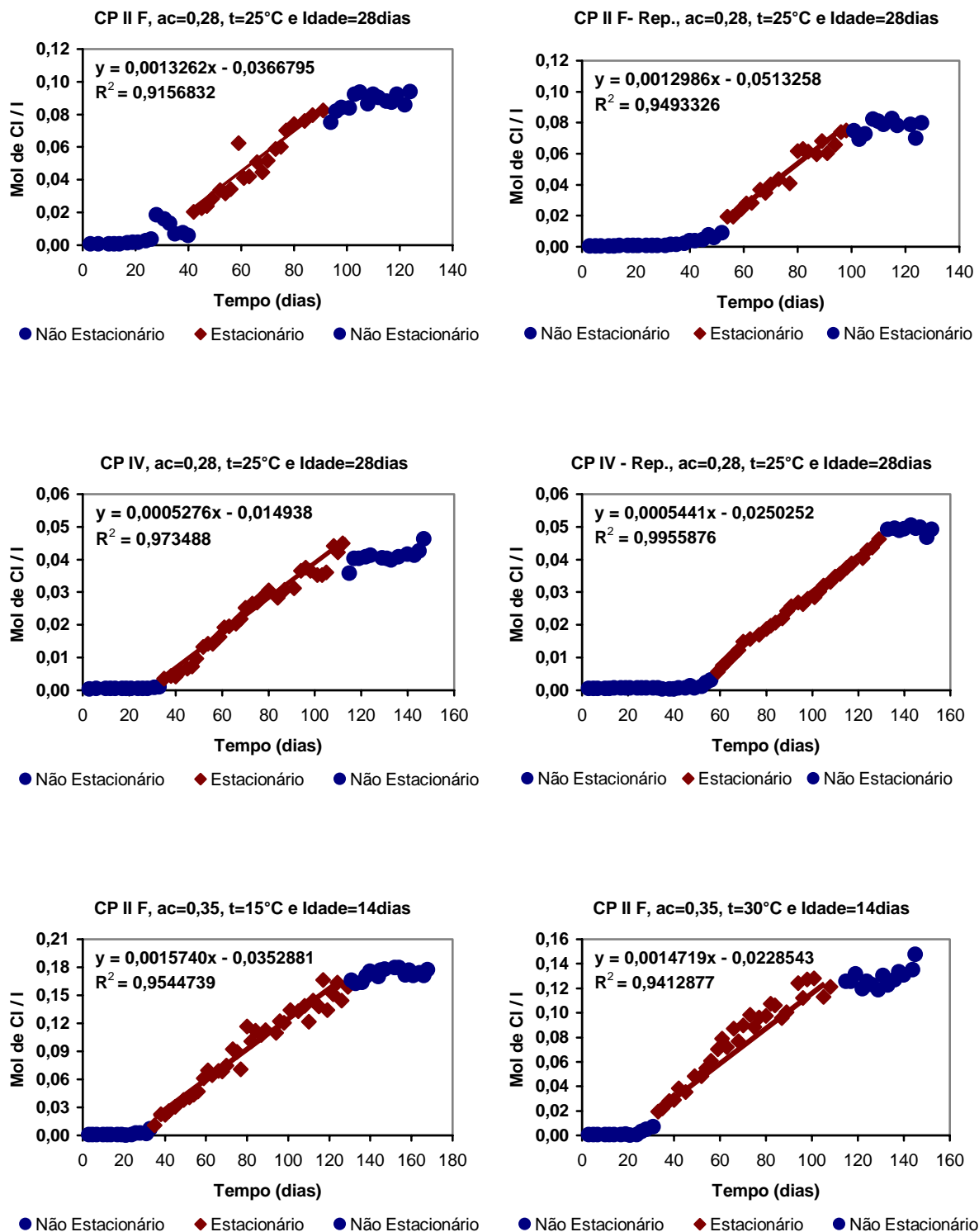
**Tabela 16** Resultados dos coeficientes de difusão do ensaio de migração, dos concretos produzidos com CP II F

Tipo de Cimento	Concreto			Temp. do ensaio (°C)	Fluxo de íons (*10 <sup>-10</sup> mol/s/cm <sup>2</sup> )	Coef. Efet. de difusão (*10 <sup>-9</sup> cm <sup>2</sup> /s)
	ac	Idade (dias)	Temp. de expos. (°C)			
CP II F	0,28	28	25	19,5	2,87143	3,015
				20,1	2,81167	2,959
	0,35	14	15	23,1	3,40795	3,623
			30	22,7	3,18689	3,383
		63	15	22,3	3,22326	3,417
			30	21,3	2,97210	3,140
	0,45	7	25	23,7	5,62074	5,987
				23,7	5,62853	5,996
		28	5	21,7	5,66642	5,995
				21,9	5,75866	6,097
			25	18,7	4,92594	5,159
				20,2	5,00215	5,265
			40	22,6	3,02862	3,214
				22,1	2,96366	3,140
		91	25	22,3	4,13501	4,384
				24,0	3,92152	4,181
	0,60	14	15	17,7	5,41808	5,655
			30	16,7	4,92421	5,122
		63	15	21,0	4,13739	4,367
			30	20,6	3,36963	3,552
0,75	28	25	26,1	6,10833	6,559	
			25,9	6,09209	6,537	

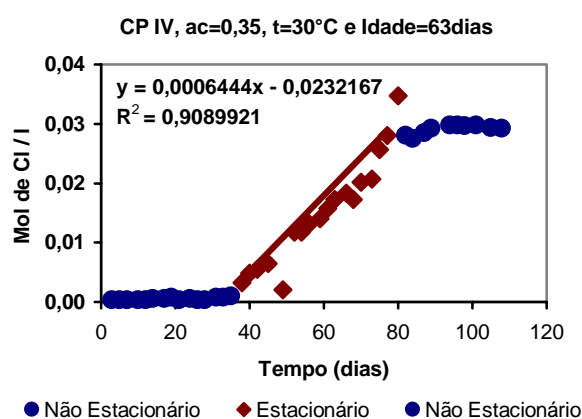
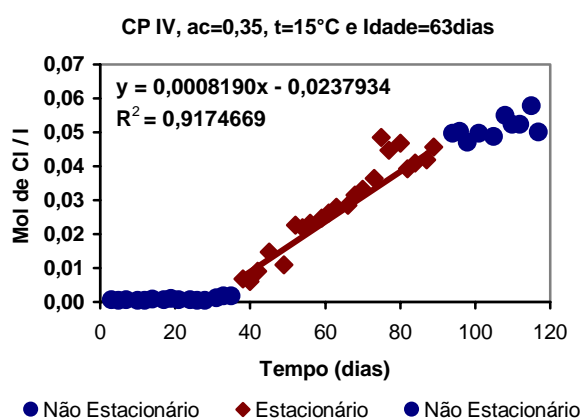
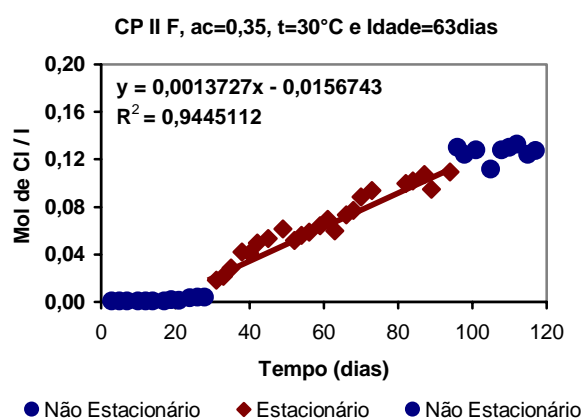
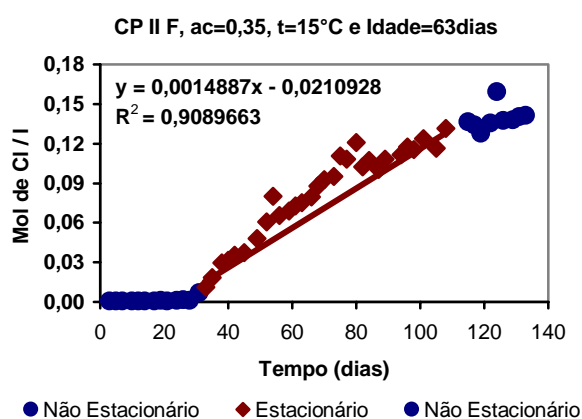
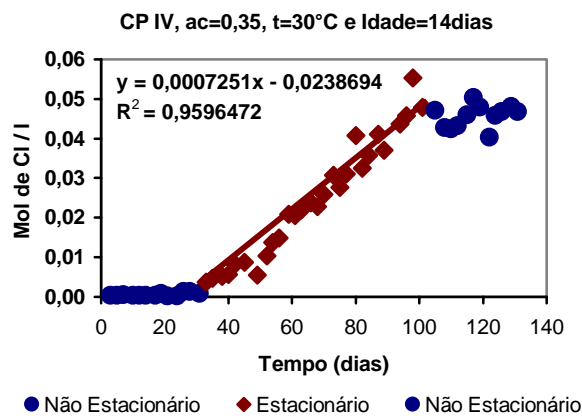
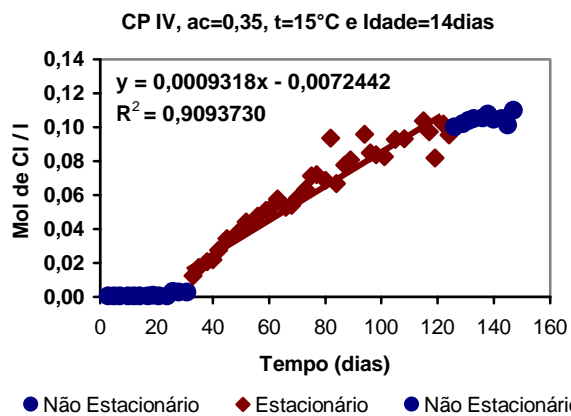
**Tabela 17** Resultados dos coeficientes de difusão do ensaio de migração, dos concretos produzidos com CP IV

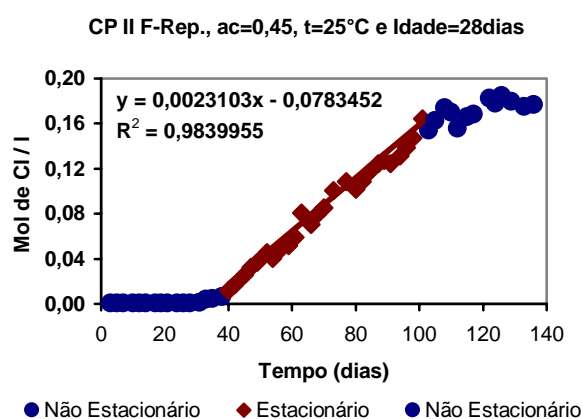
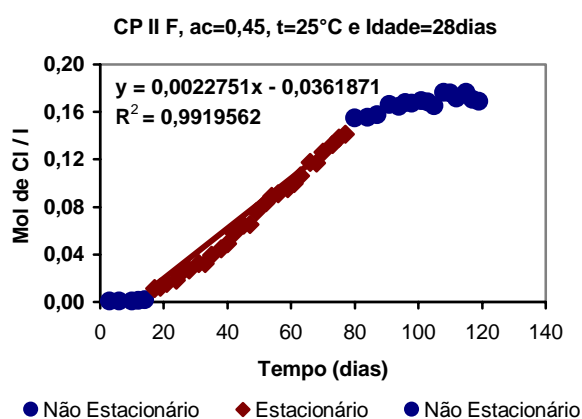
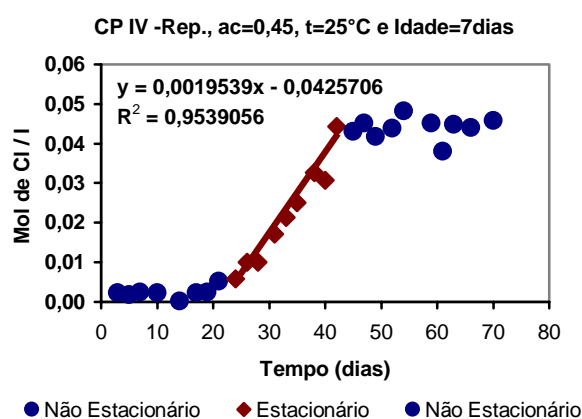
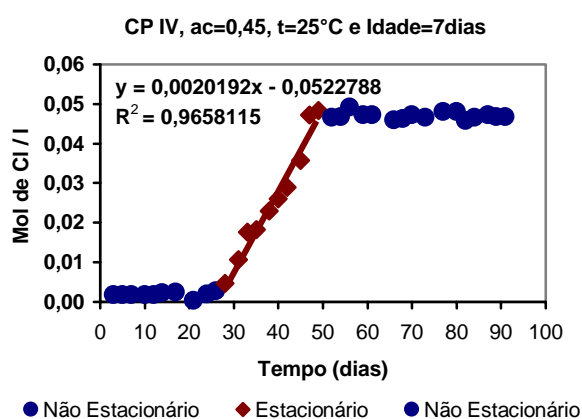
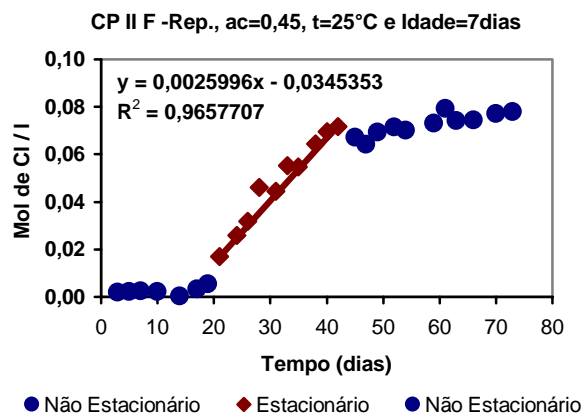
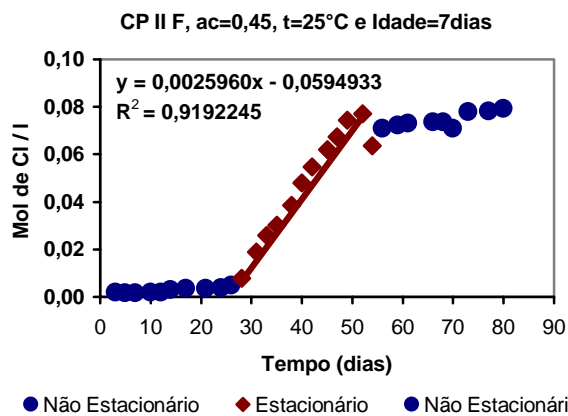
Tipo de Cimento	Concreto			Temp. do ensaio (°C)	Fluxo de íons (*10 <sup>-10</sup> mol/s/cm <sup>2</sup> )	Coef. Efet. de difusão (*10 <sup>-9</sup> cm <sup>2</sup> /s)	
	ac	Idade (dias)	Temp. de expos. (°C)				
CP IV	0,28	28	25	19,9	1,14233	1,201	
				20,6	1,17806	1,242	
	0,35	14	15	22,5	2,01749	2,140	
				21,7	1,56995	1,661	
		63	15	21,9	1,77326	1,877	
				30	21,5	1,39522	1,475
	0,45	7	25	23,9	4,37188	4,660	
				24,0	4,23049	4,511	
		28	5	25	21,6	3,86177	4,084
					22,3	3,80850	4,038
					19,6	3,05849	3,213
			40	25	20,4	3,04355	3,206
					23,3	1,71523	1,825
					24,1	1,70224	1,816
		91	25	25	24,0	1,89992	2,026
					24,1	1,91270	2,040
	0,60	14	15	16,9	3,68834	3,839	
				30	16,6	3,63940	3,784
		63	15	21,4	3,57467	3,778	
				30	21,5	3,19945	3,383
0,75	28	25	26,3	4,96448	5,335		
			25,8	5,04567	5,413		

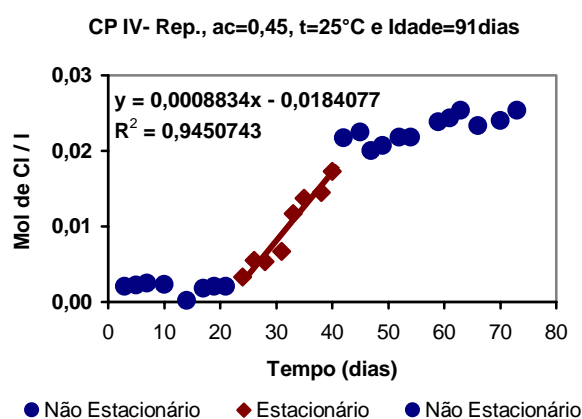
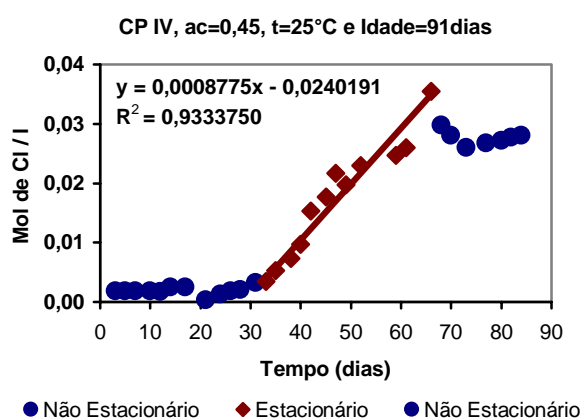
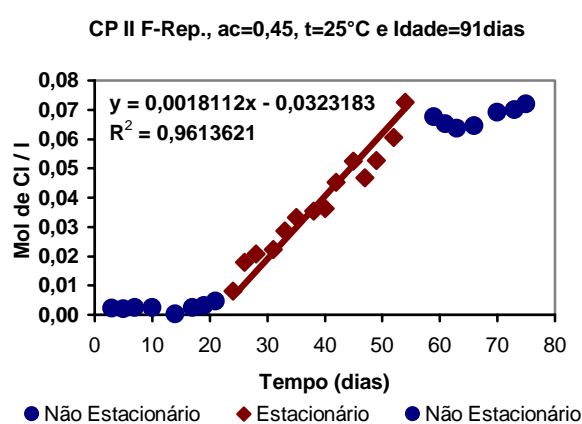
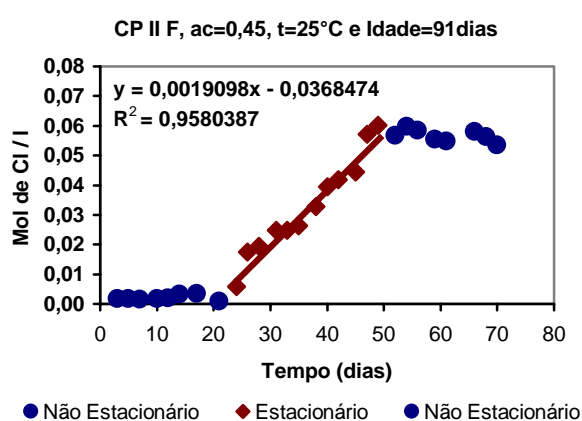
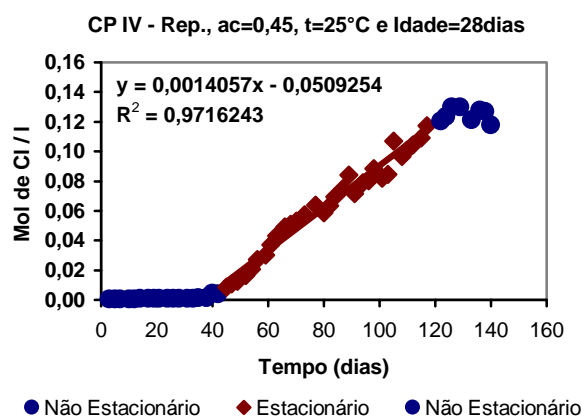
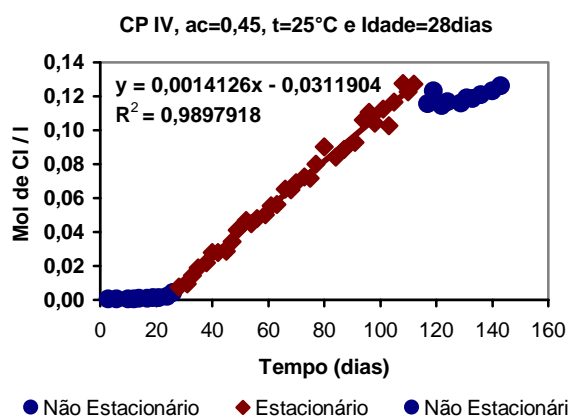
**Figura 44** Evolução da concentração de cloretos com o tempo, dos concretos produzidos no ensaio de migração de cloretos

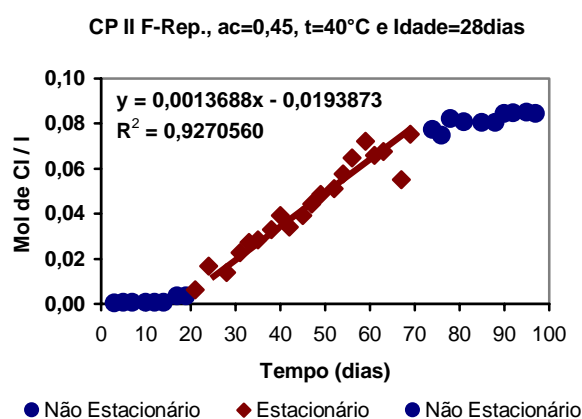
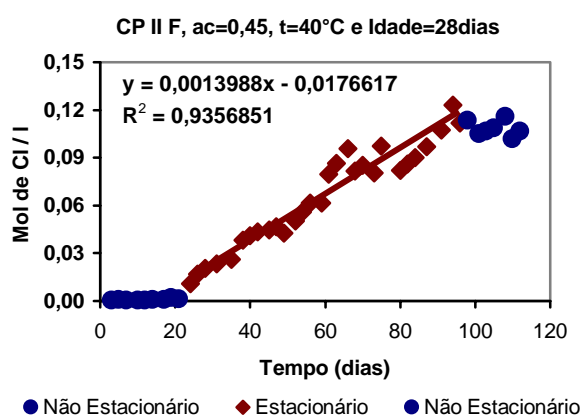
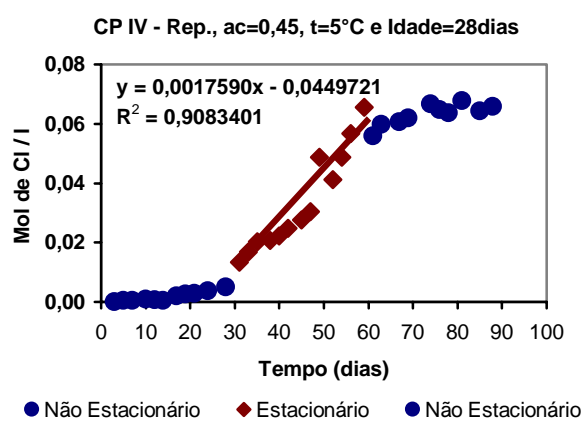
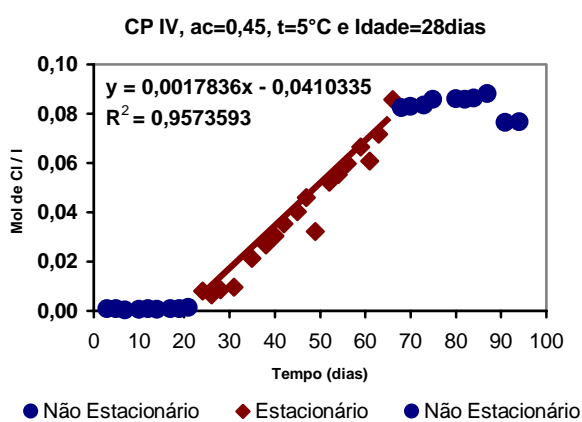
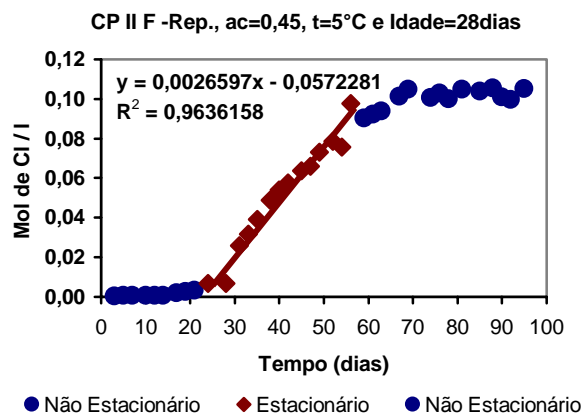
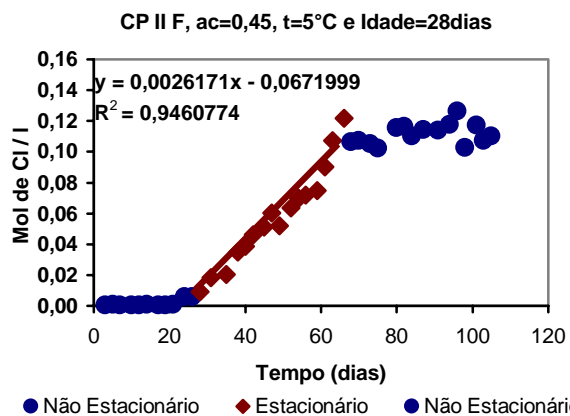


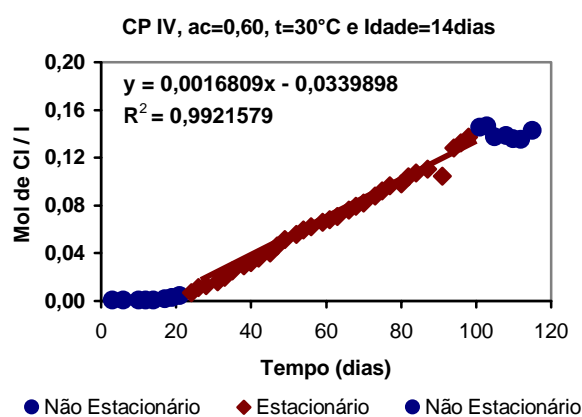
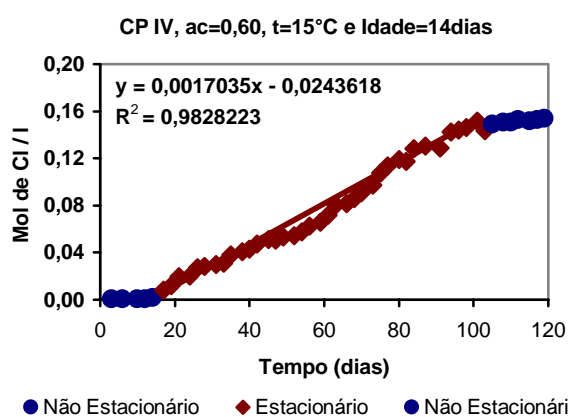
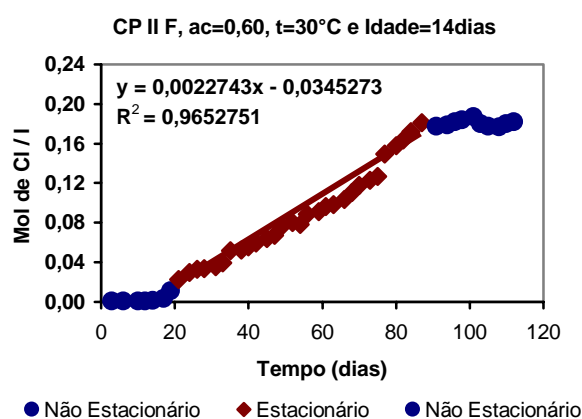
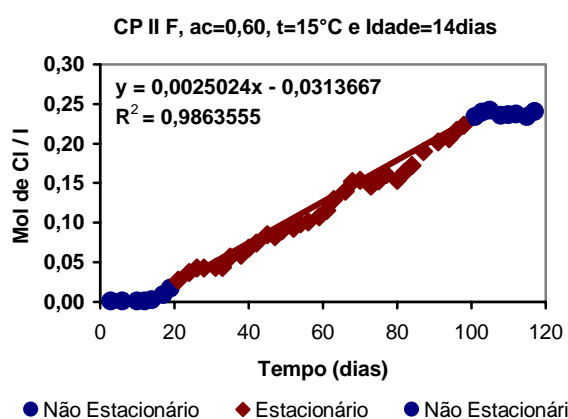
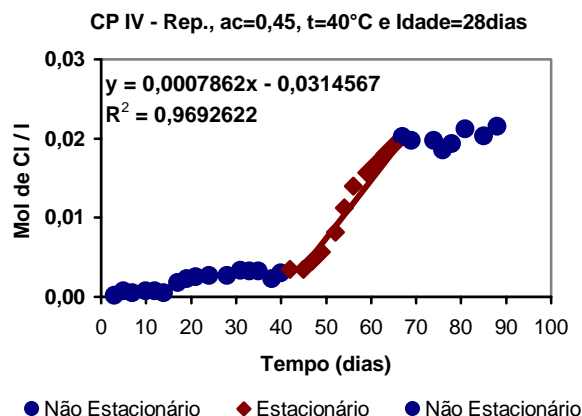
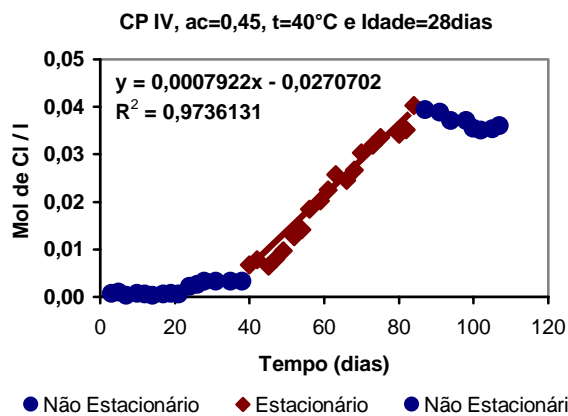


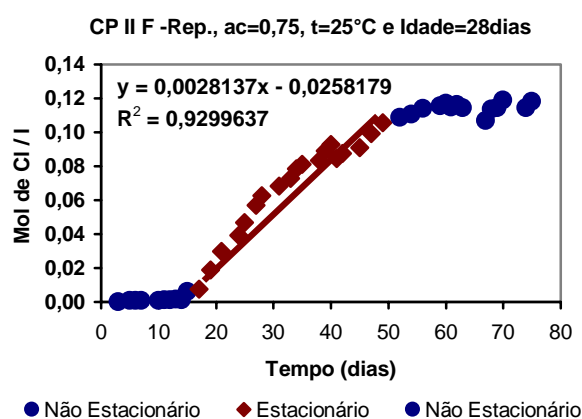
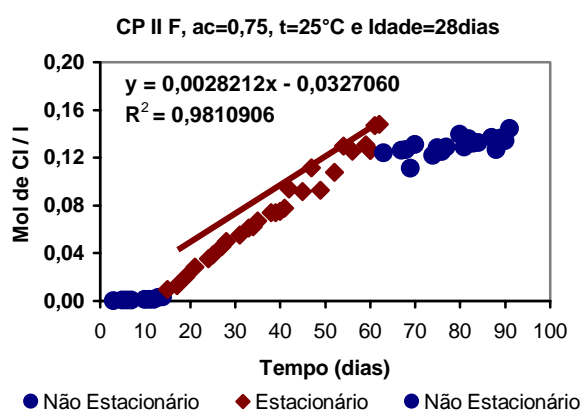
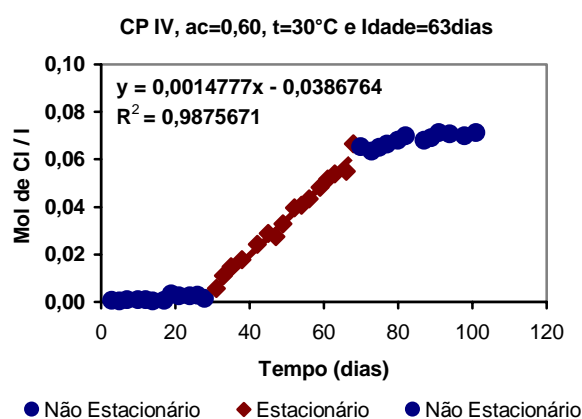
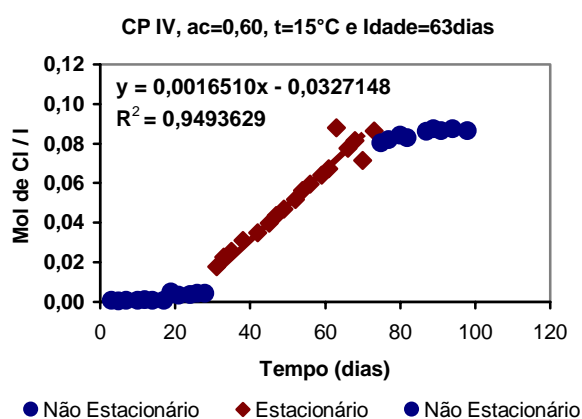
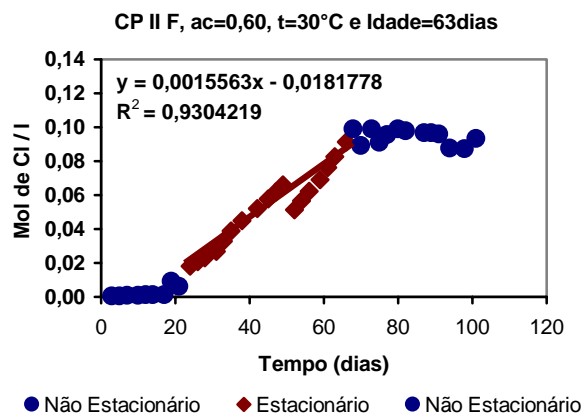
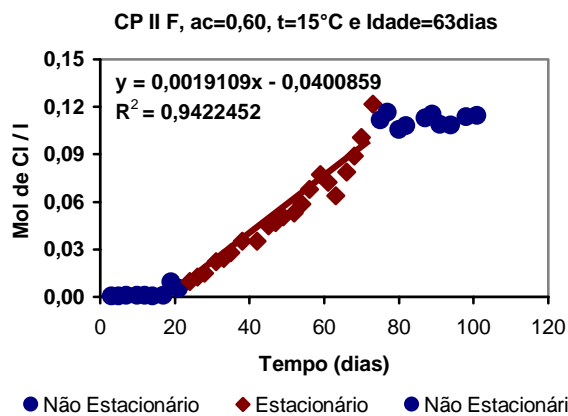


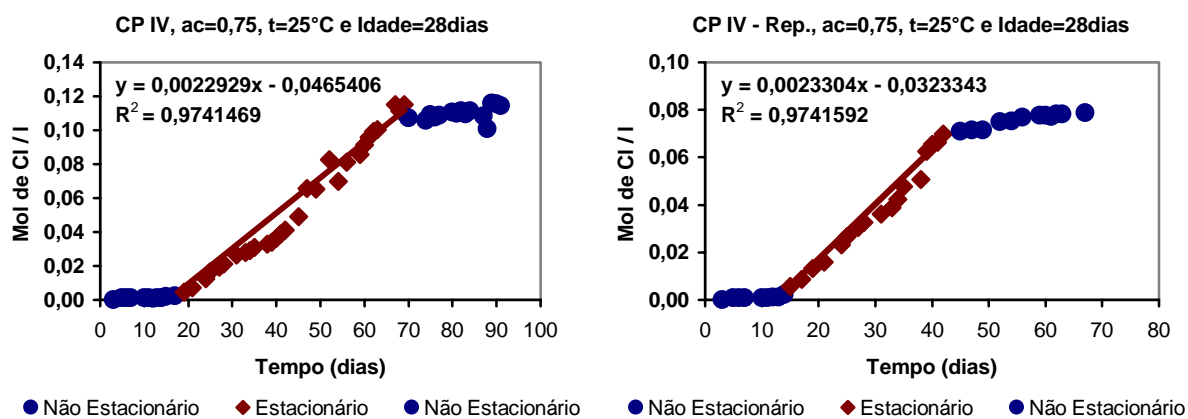




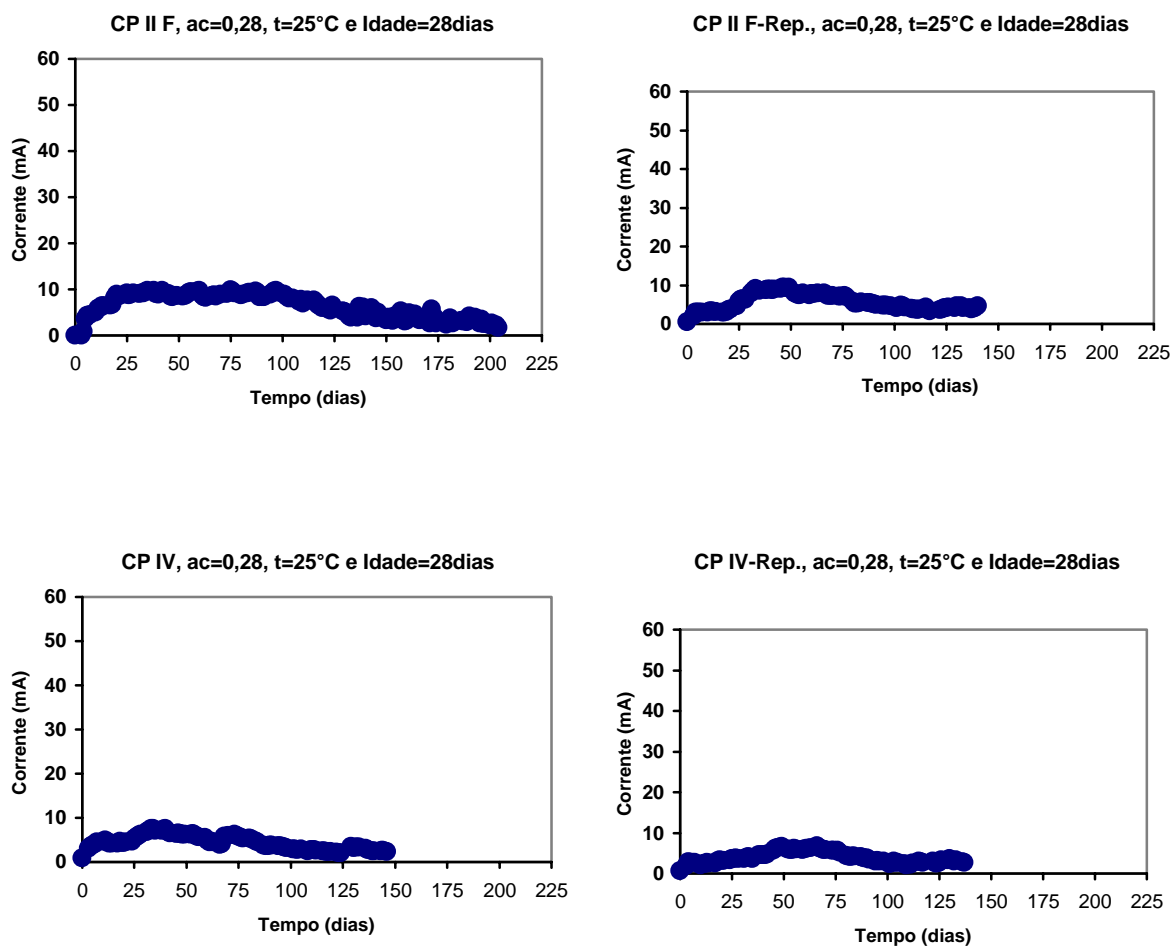


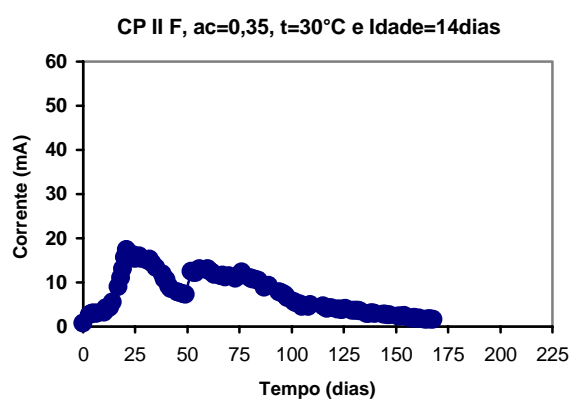
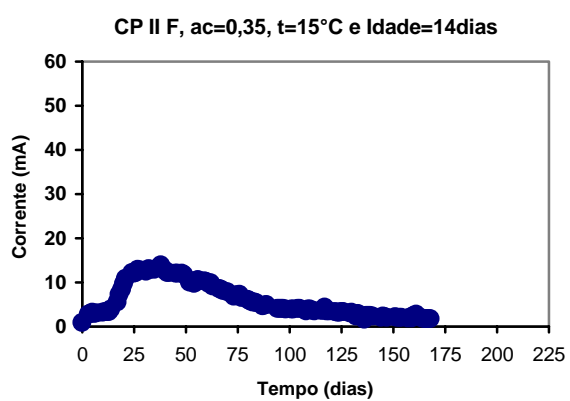
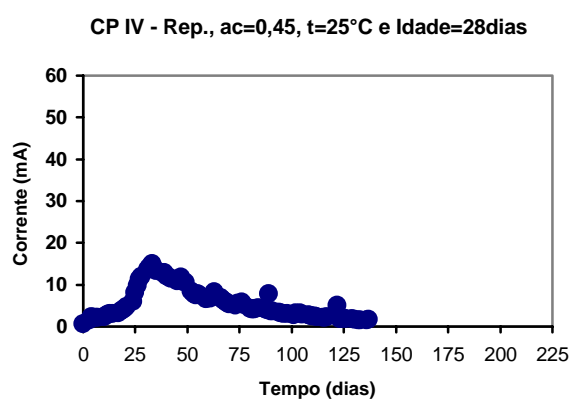
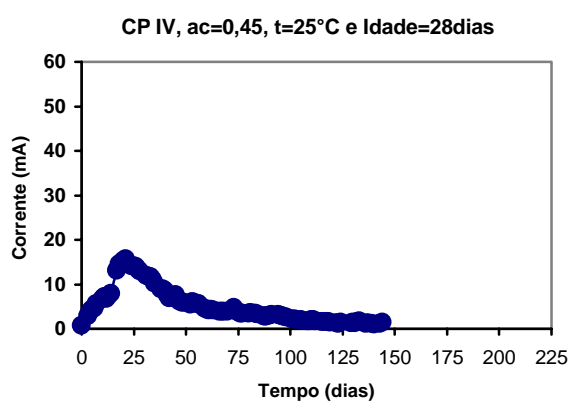
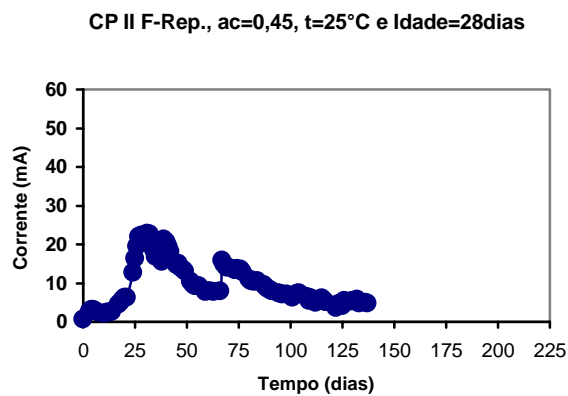
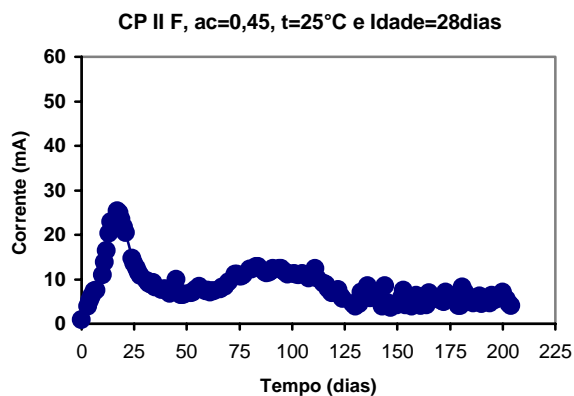




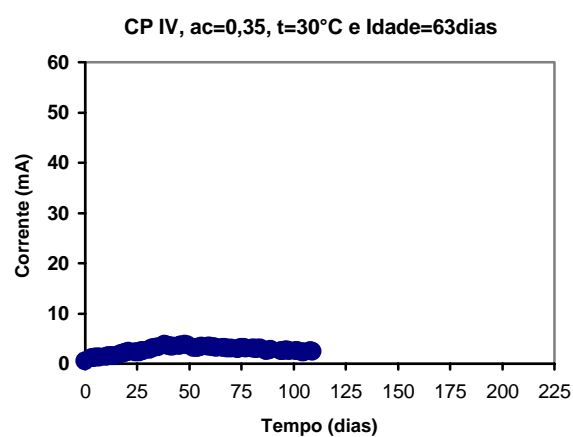
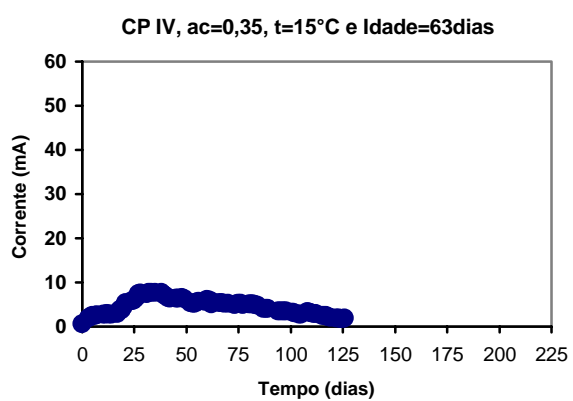
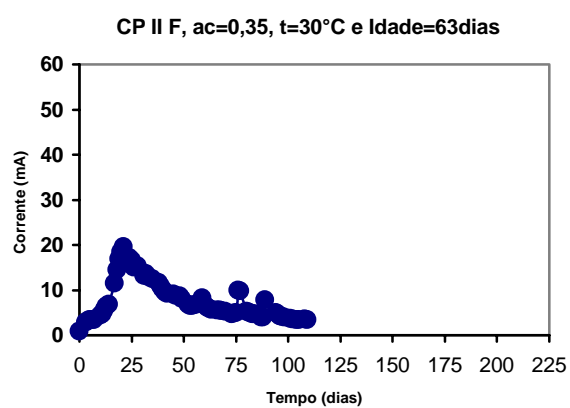
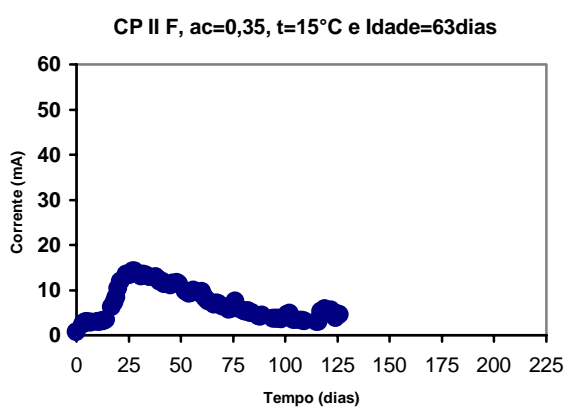
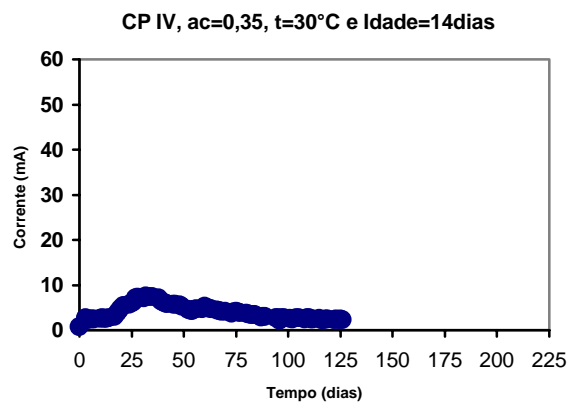
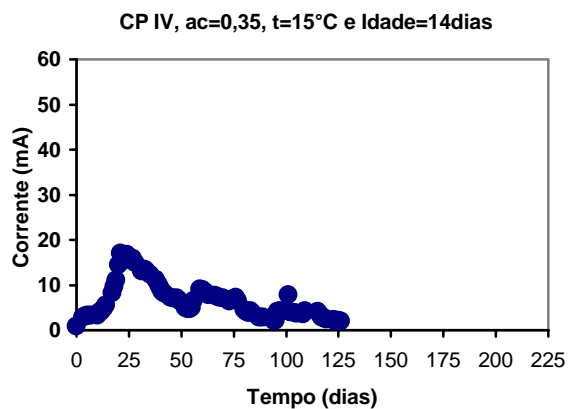


**Figura 45** Evolução da corrente com o tempo, dos concretos produzidos no ensaio de migração de cloretos

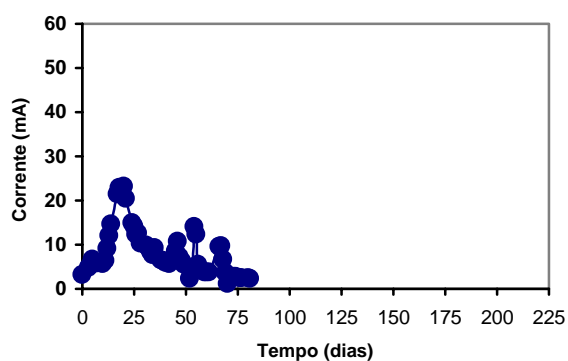




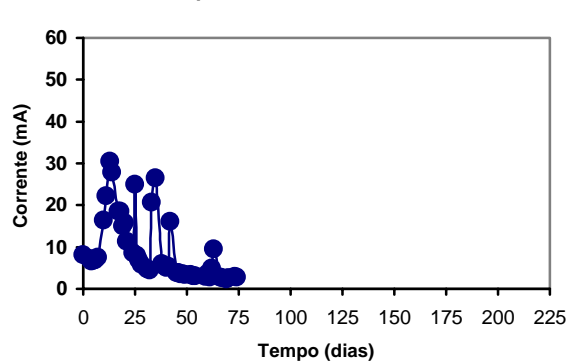




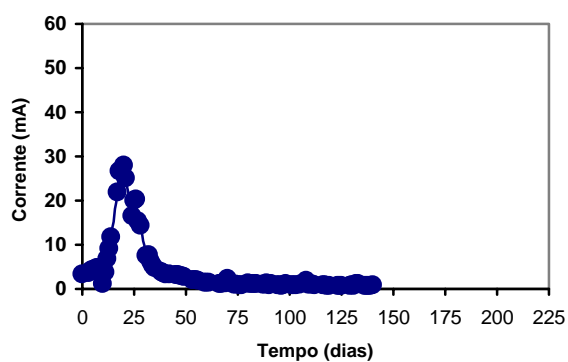
CP II F, ac=0,45, t=25°C e Idade=7dias



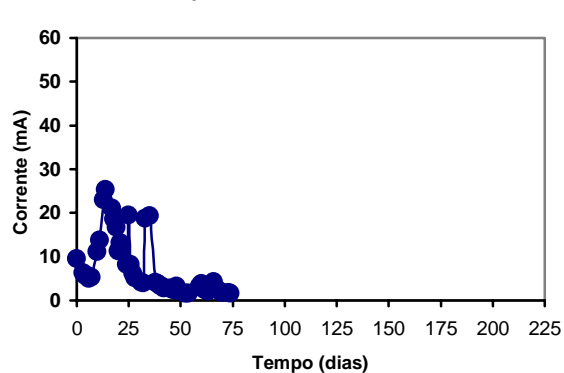
CP II F -Rep., ac=0,45, t=25°C e Idade=7dias



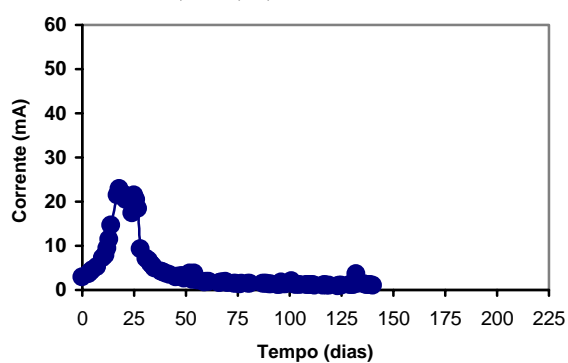
CP IV, ac=0,45, t=25°C e Idade=7dias



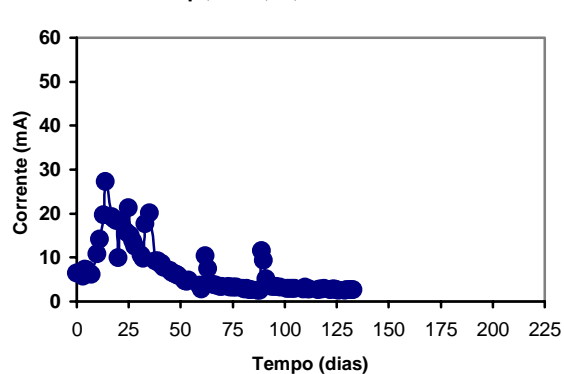
CP IV - Rep., ac=0,45, t=25°C e Idade=7dias

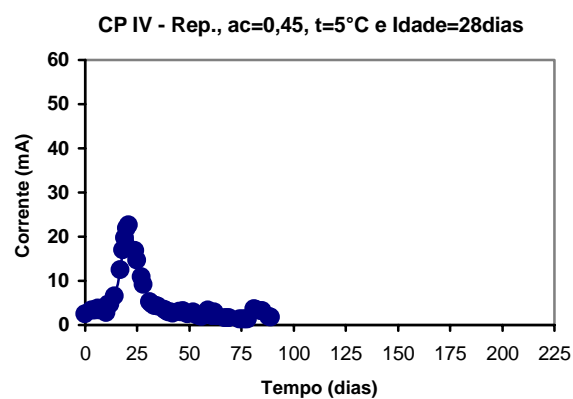
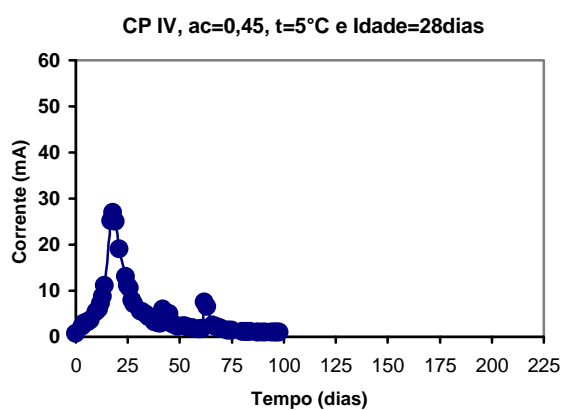
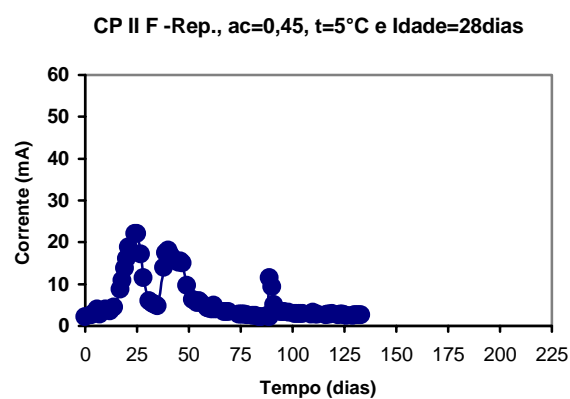
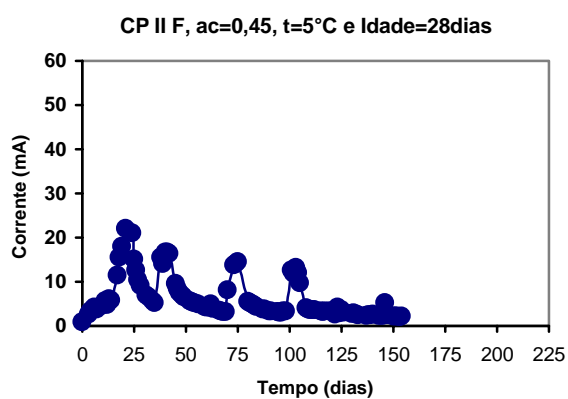
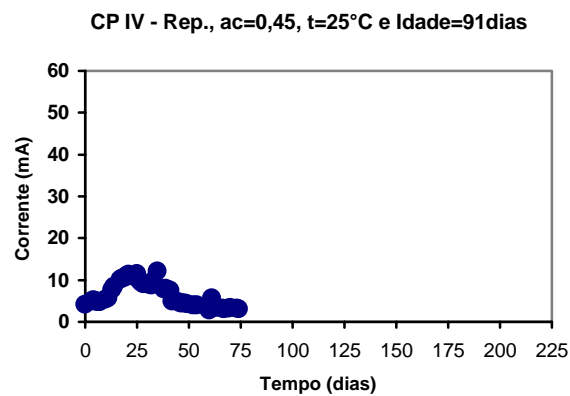
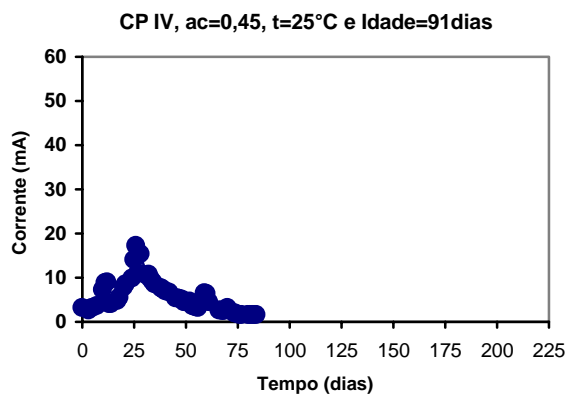


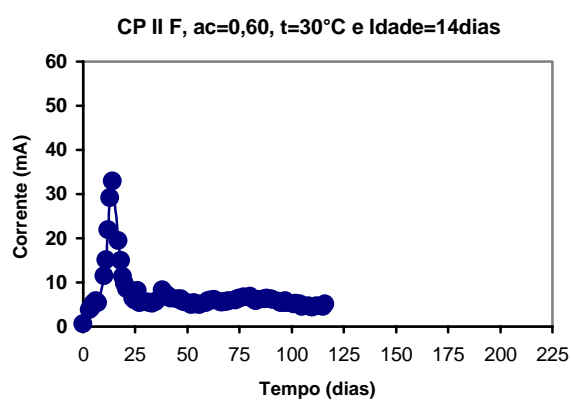
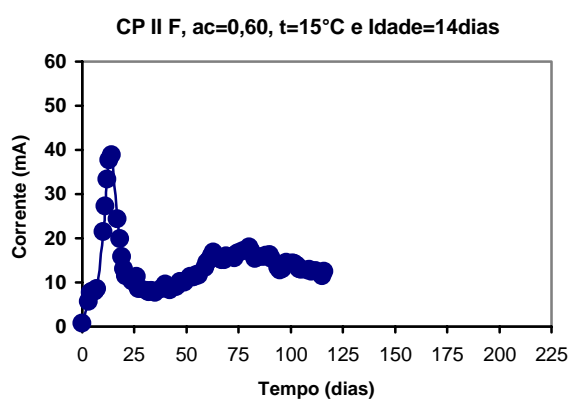
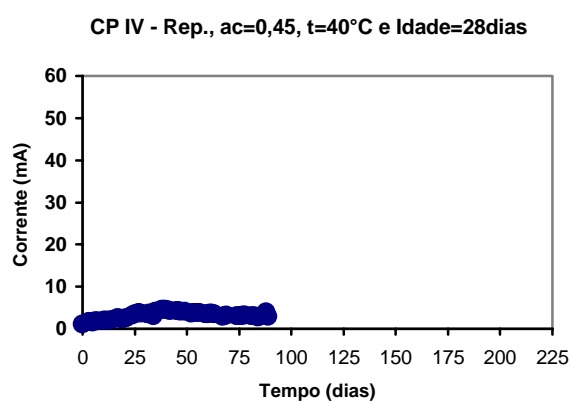
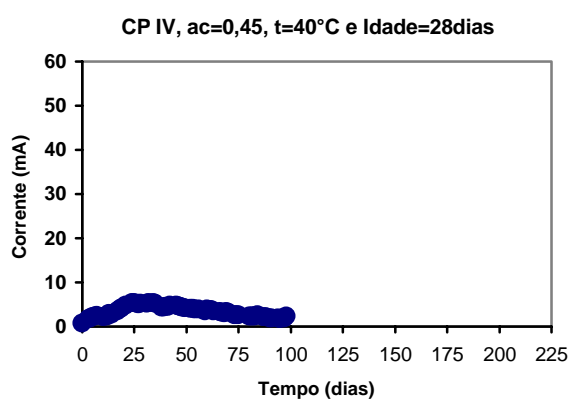
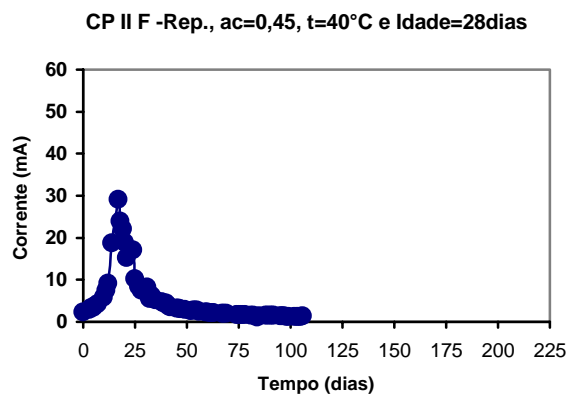
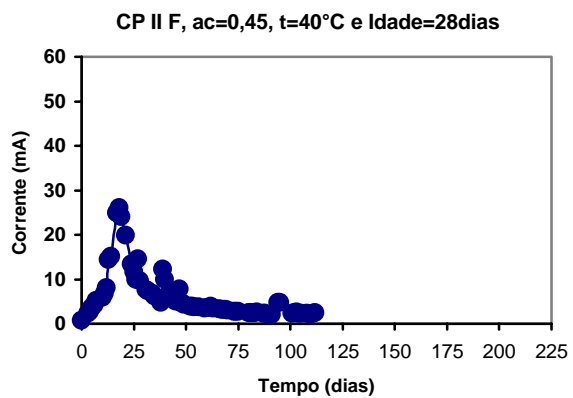
CP II F, ac=0,45, t=25°C e Idade=91dias

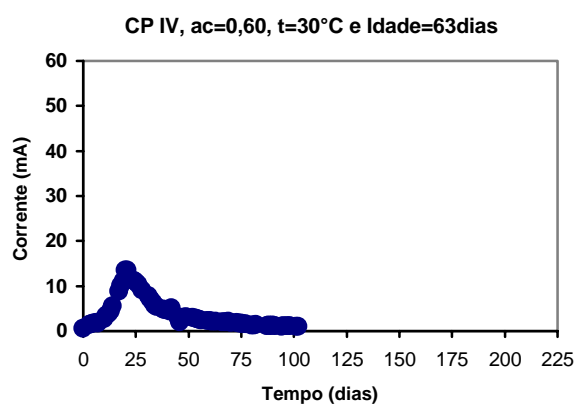
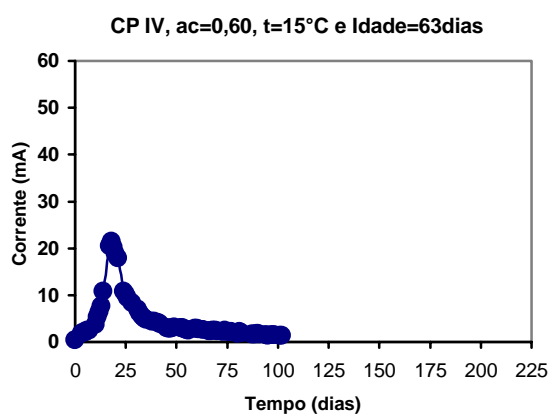
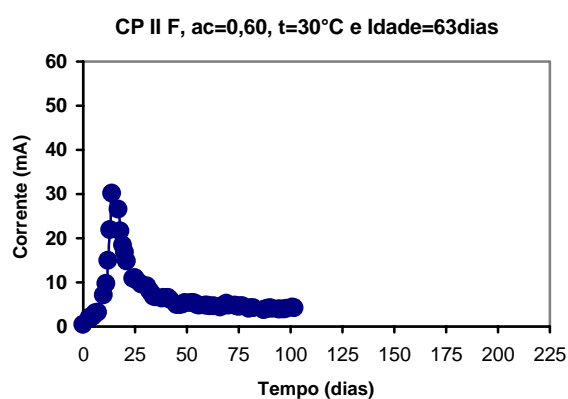
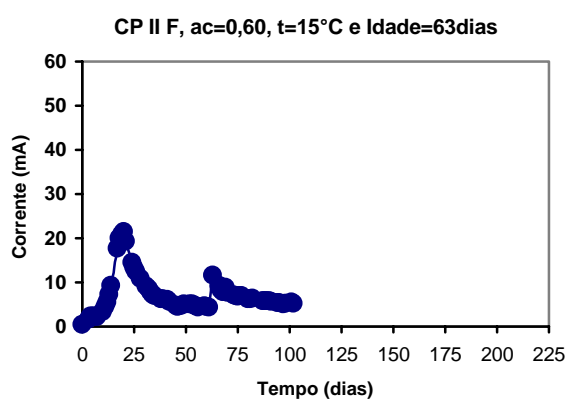
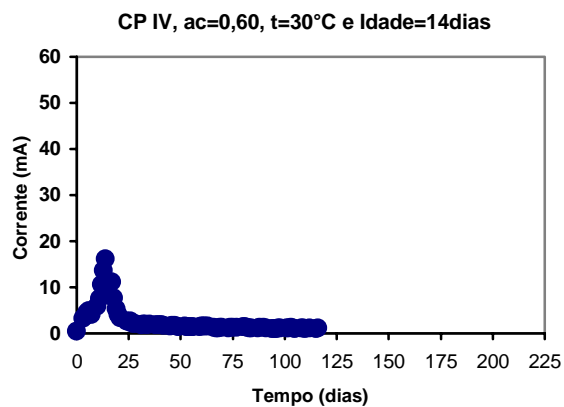
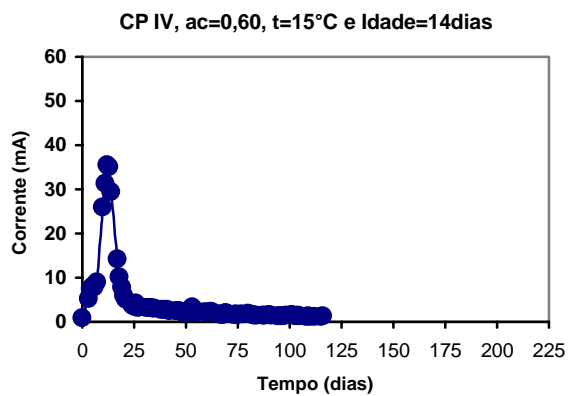


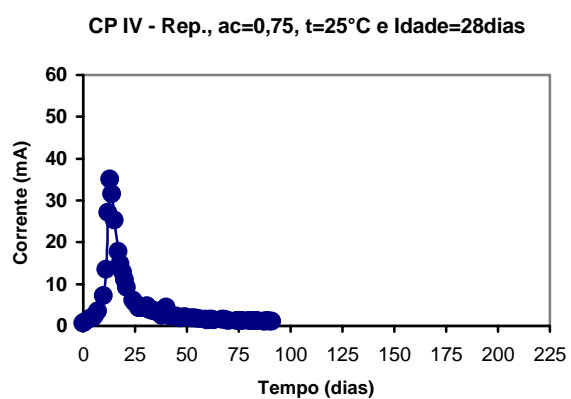
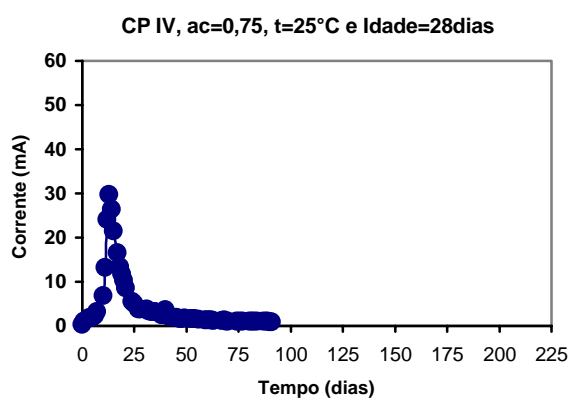
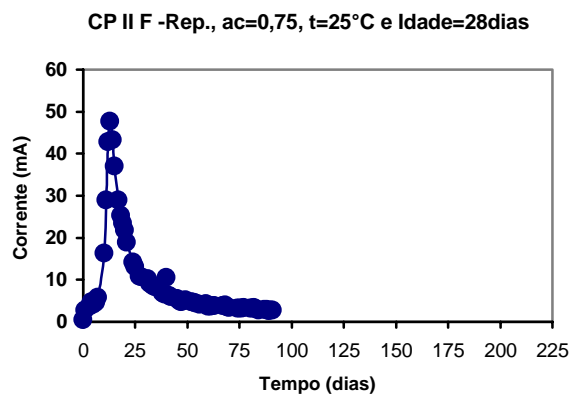
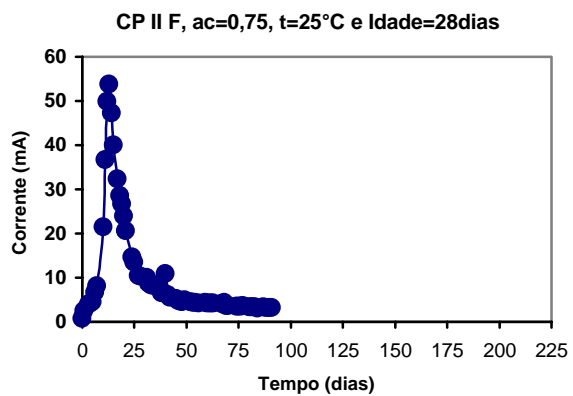
CP II F -Rep., ac=0,45, t=25°C e Idade=91dias











**ANEXO 4 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA TODAS AS  
VARIÁVEIS ANALISADAS**

## Análise estatística dos resultados encontrados no ensaio de resistência à compressão

### Multiple Regression Analysis

Dependent variable: ComprAB

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	33,9939	1,16911	29,0767	0,0000
ac	-24,6967	1,01831	-24,2526	0,0000
Idade	7,72409	0,907758	8,50898	0,0000
Temp	3,59965	1,37848	2,61131	0,0131
ac*Temp	-7,05202	3,62604	-1,94483	0,0596
ac^2	11,0997	1,59706	6,95012	0,0000
Idade^2	-5,27383	1,71562	-3,07401	0,0040
TCP	-1,37023	0,520743	-2,63129	0,0124

### Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	10485,8	7	1497,98	125,55	0,0000
Residual	429,538	36	11,9316		
Total (Corr.)	10915,4	43			

R-squared = 96,0648 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 95,2997 percent

Standard Error of Est. = 3,45422

Mean absolute error = 2,58723

Durbin-Watson statistic = 1,88867

### The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between ComprAB and 7 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{ComprAB} = 33,9939 - 24,6967 \cdot \text{ac} + 7,72409 \cdot \text{Idade} + 3,59965 \cdot \text{Temp} - 7,05202 \cdot \text{ac} \cdot \text{Temp} + 11,0997 \cdot \text{ac}^2 - 5,27383 \cdot \text{Idade}^2 - 1,37023 \cdot \text{TCP}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 96,0648% of the variability in ComprAB. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 95,2997%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 3,45422. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 2,58723 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is greater than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0596, belonging to ac\*Temp. Since the P-value is less than 0.10, that term is statistically significant at the 90% confidence level. Depending on the confidence level at which you wish to work, you may or may not decide to remove ac\*Temp from the model.



## Análise estatística dos resultados encontrados no ensaio de penetração acelerada de cloretos

## Multiple Regression Analysis

Dependent variable: PenAB

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	4817,01	346,863	13,8874	0,0000
ac	3979,56	531,99	7,48051	0,0000
Idade	-2300,72	495,524	-4,643	0,0000
Temp	-3236,73	572,672	-5,65198	0,0000
TCP*Idade	-847,053	435,472	-1,94513	0,0592
TCP*Temp	-1501,77	569,061	-2,63904	0,0120

## Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	4,43041E8	5	8,86082E7	24,18	0,0000
Residual	1,39225E8	38	3,66382E6		
Total (Corr.)	5,82266E8	43			

R-squared = 76,0891 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 72,9429 percent

Standard Error of Est. = 1914,11

Mean absolute error = 1246,66

Durbin-Watson statistic = 0,817116

## The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between PenAB and 5 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{PenAB} = 4817,01 + 3979,56 \cdot \text{ac} - 2300,72 \cdot \text{Idade} - 3236,73 \cdot \text{Temp} - 847,053 \cdot \text{TCP} \cdot \text{Idade} - 1501,77 \cdot \text{TCP} \cdot \text{Temp}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 76,0891% of the variability in PenAB. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 72,9429%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 1914,11. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 1246,66 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0592, belonging to TCP\*Idade. Since the P-value is less than 0.10, that term is statistically significant at the 90% confidence level. Depending on the confidence level at which you wish to work, you may or may not decide to remove TCP\*Idade from the model.

## Análise estatística dos resultados encontrados no ensaio de migração de cloretos

### Multiple Regression Analysis

Dependent variable: MigrAB

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	3,95998	0,120816	32,777	0,0000
ac	1,68574	0,185298	9,09743	0,0000
Idade	-0,697335	0,172596	-4,04027	0,0002
Temp	-0,9577	0,199468	-4,80128	0,0000
TCP	-0,777977	0,10051	-7,74033	0,0000

### Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	81,4943	4	20,3736	45,84	0,0000
Residual	17,3353	39	0,444496		
Total (Corr.)	98,8296	43			

R-squared = 82,4594 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 80,6603 percent

Standard Error of Est. = 0,666705

Mean absolute error = 0,508478

Durbin-Watson statistic = 0,93958

### The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between MigrAB and 4 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{MigrAB} = 3,95998 + 1,68574 \cdot \text{ac} - 0,697335 \cdot \text{Idade} - 0,9577 \cdot \text{Temp} - 0,777977 \cdot \text{TCP}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 82,4594% of the variability in MigrAB. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 80,6603%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,666705. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,508478 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0002, belonging to Idade. Since the P-value is less than 0.01, the highest order term is statistically significant at the 99% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.